



TITLE:

放射性廃棄物処分のセーフティケース構築におけるストーリーボードの適用性研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

河村, 秀紀

CITATION:

河村, 秀紀. 放射性廃棄物処分のセーフティケース構築におけるストーリーボードの適用性研究. 京都大学, 2009, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2009-01-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r12289>

RIGHT:

許諾条件により本文は2010-01-23に公開

放射性廃棄物処分のセーフティケース構 築におけるストーリーボードの適用性研究

河 村 秀 紀

要 旨

本論文は、原子力エネルギー利用から発生する高レベル放射性廃棄物地層処分の長期安全性を説明するセーフティケース構築のために、処分システムの長期変遷を多面的に俯瞰できる手法として開発したストーリーボードの適用性について研究した成果を記述している。

原子力エネルギー利用の賛否に関しては、世界中で多くの議論がなされている。しかし、利用の結果発生する放射性廃棄物の処理・処分の問題については、利便を受けたわれわれの世代で責任を持って対処すべきであるとする原則が、広く受け容れられている。その具体的な方策として、様々なオプションが検討され、現状の技術で実現可能で、最も信頼性の高いと判断される「地層処分」の概念がわが国を含め世界各国で選択されてきた。

地層処分においては、長期の安全性を確保するために、深部の地層が本来有する物質を閉じ込める特性（天然バリア）と工学的に放射性物質を閉じ込める対策（工学バリア）を組み合わせた多重バリアシステムが、世界共通の安全概念として選択された。この多重バリアシステムの性能を定量的に求め、要求される安全レベルの遵守を示す手法として確立されたのが安全評価手法であり、この手法を用いて、地層処分概念の科学・工学的な実現可能性が明示されてきた。

地層処分が実施段階に移行するにつれ明らかになった最も重要でかつクリティカルな課題は、処分実現に関連する様々なステークホルダーに地層処分をどのように受け容れてもらうかである。数十万年以上にわたる長期の安全性を示すには、多岐にわたる専門的な知識の統合化が必要であり、そこには高度な専門的判断が介在するため、多くのステークホルダーにとって、処分の安全性の本質を理解することが極めて難しくなっている。このような現実的な課題に対処するために、2000年代初頭に、安全評価による定量的な解析結果だけでなく、多方面にわたるエビデンスと説得力のある議論を統合した、セーフティケースの概念が国際機関を中心に提唱され、わが国においても実施主体を中心に準備が進められてきている。

セーフティケースを構築するためには、地層処分の安全概念の仕組みを分かりやすくかつ透明性をもって説明できる手法が不可欠である。本論文の前半では、地層処分の安全確保の基本概念であるパッシブ・セーフティに至るまでに必要となる統合化されたセーフティケース構築に着目した研究成果を示している。統合化されたセーフティケースとは、処分場の閉鎖前の安全性や品質確保に着目したセーフティケースと閉鎖後の長期安全性に着目したセーフティケースを、処分場建設というアクティブな状態からパッシブな状態に移行する意思決定をサポートする観点から

構築するものである。

統合化されたセーフティケースを構築するアプローチとして、工学的、科学のおよび社会・倫理的な観点からの取り組みの重要性を、様々なプロジェクトでの研究成果を用いて検証している。セーフティケースを用いて様々なステークホルダーの受容を得るには、まず分野の異なる専門家が、地層処分の安全性について共通の場で議論できるプラットフォームが必要であること、議論結果が容易に他のステークホルダーに説明できるインターフェースが必要であることを提唱している。

このような背景および要件を出発点として、地層処分の安全確保の方策を俯瞰的に理解するために、処分の状態変遷を異なる時間枠で、また着眼する対象領域のスケールで議論できるストーリーボードの概念を開発した。ストーリーボードでは、処分場の建設前の初期状態から処分場の建設・操業時での周辺への影響の範囲とそのプロセスを記述することで、周辺住民が危惧する事項への回答を準備するとともに、アクティブな状態からパッシブ・セーフティへの移行がどのような状況で実現されるのかを視覚的に、また工学・科学的な状況分析を踏まえて記述している。さらにストーリーボードには、長期の評価で扱う最も蓋然性の高い状態変遷の予測とそれに伴う不確実性を記述することで、セーフティケース構築上での留意すべき時間枠と評価スケールを同定することができている。

わが国で進められている放射性廃棄物処分プロジェクトのセーフティケース構築に、開発したストーリーボードを適用した結果、技術的な観点からは、処分事業の各段階でセーフティケースを構築する上でのテンプレートとして活用できることと、多分野の専門家が議論を行う共通のプラットフォームとしての役割を果たすことができること、また、社会・倫理的な観点からは、処分システムの安全確保の仕組みについて、ステークホルダーに分かりやすく説明できるインターフェースとして有効であることを確認している。

目 次

第1章 序論.....	1-1
1.1 研究の背景	1-1
1.2 研究の目的	1-4
(1) 対象とする課題	1-4
(2) 課題解決に向けてのアプローチ	1-5
1.3 研究論文の構成	1-7
第2章 地層処分における安全確保の考え方とセーフティケース	2-1
2.1 地層処分の概念と安全評価	2-1
(1) 地層処分の安全概念	2-1
(2) 安全評価の課題	2-6
(3) セーフティケースの誕生	2-7
(4) 地層処分の安全確保の基本的考え方	2-8
2.2 放射性廃棄物と処分概念.....	2-10
(1) 放射性廃棄物の発生源.....	2-10
(2) 安全確保の方策と処分概念	2-11
2.3 セーフティケースの概念.....	2-12
第3章 セーフティケースの統合化.....	3-1
3.1 閉鎖前のセーフティケース	3-1
3.1.1 処分場操業時の安全性と品質確保.....	3-2
(1) 研究の背景.....	3-2
(2) 操業プロセスの概念と遠隔操作	3-2
(3) 操業安全と品質確保への要件と原則	3-3
(4) 安全・品質原則と遠隔操業プロセス	3-5
(5) 操業時の安全確保への要件の階層構造化.....	3-6
(6) まとめと今後の展開	3-8

3.1.2 人工バリアシステムの高度化.....	3-11
(1) 研究の背景.....	3-11
(2) 高度化に向けて考慮すべき事項	3-11
(3) PEM 概念.....	3-12
(4) PEM 概念の高度化	3-13
(5) 間隙の充填.....	3-15
(6) 処分場規模への影響	3-15
(7) まとめと今後の展開	3-17
3.2 閉鎖後セーフティケース：セーフティケースからナチュラルアナログへの期待	3-20
(1) 研究の背景.....	3-20
(2) セーフティケースとナチュラルアナログ	3-21
(3) わが国で想定される立地環境と処分概念.....	3-22
(4) ナチュラルアナログに期待されるゴール	3-23
(5) まとめと今後の展開	3-30
3.3 セーフティケースの統合.....	3-32
(1) 研究の背景.....	3-32
(2) セーフティケースと安全機能.....	3-32
(3) セーフティケースの統合化に向けての指標	3-34
(4) 統合化されたセーフティケースの段階的な変遷.....	3-37
(5) 統合化されたセーフティケースの活用：人工バリアの定置への品質要件 ...	3-39
(6) 統合化セーフティケースへの要件.....	3-43
(7) まとめと今後の展開	3-46
第4章 セーフティケースへのアプローチ	4-1
4.1 工学的アプローチ	4-1
4.1.1 多機能工学バリアシステム：Smart Subsurface Barrier System	4-2
(1) 研究の背景.....	4-2
(2) 現地の状況.....	4-3
(3) 研究開発の目標	4-3
(4) 開発目標への対応策	4-4

(5) 研究開発の手順	4-5
(6) 研究開発の体制とスケジュール	4-5
(7) 研究開発成果	4-6
(8) 実規模実証試験	4-9
(9) まとめと今後の展開	4-11
4.1.2 大規模空洞処分概念研究：CARE	4-13
(1) 研究の背景	4-13
(2) 大規模空洞処分概念の特徴	4-14
(3) 大規模空洞処分場の概略設計	4-15
(4) 人工バリアシステムの概念	4-16
(5) 長期貯蔵中の安定と安全性	4-18
(6) 長期の放射線学的な安全性	4-21
(7) 第2次取りまとめ処分場概念と CARE 概念の数量比較	4-23
(8) まとめと CARE 概念の展開	4-24
4.2 科学的アプローチ	4-26
4.2.1 Geosynthesis を考慮した調査システムフローの研究	4-26
(1) 研究の背景	4-26
(2) Geosynthesis の具現化：調査システムフローの開発	4-27
(3) 文献調査システムフローの概念	4-27
(4) 調査システムフローの構成要素	4-28
(5) 調査システムフローの IT 化	4-35
(6) まとめと今後の展開	4-37
4.2.2 地下水流動場の変動予測に関する研究	4-38
(1) 研究の背景	4-38
(2) 地下水流動解析による予測手法と解析対象	4-38
(3) 水理地質構造モデル	4-39
(4) 解析条件	4-40
(5) 地下水流動解析	4-43
(6) パーティクルトラッキング法による地下水移行評価	4-54
(7) まとめと今後の展開	4-61

4.3 社会・倫理的アプローチ	4-62
4.3.1 制度的管理と安全レビュー	4-62
(1) 研究の背景：制度的管理とは.....	4-62
(2) 地層処分における制度的管理の基本的考え方.....	4-65
(3) わが国での「処分場の管理」	4-68
(4) まとめと残された論点.....	4-73
4.3.2 多属性効用解析を用いた意思決定手法	4-75
(1) 研究の背景：MAA	4-75
(2) 概要調査地区選定考慮事項への MAA 手法の適用	4-76
(3) MAA を用いた試解析.....	4-81
(4) まとめと今後の展開	4-83
第5章 セーフティケースとストーリーボード	5-1
5.1 ストーリーボードの開発	5-1
5.1.1 安全評価における時間枠と評価の領域	5-2
(1) 評価の時間枠.....	5-2
(2) 評価の領域.....	5-3
(3) 既存安全評価での前提.....	5-4
5.1.2 ストーリーボードの誕生.....	5-6
(1) ストーリーボードの開発目標	5-6
(2) ストーリーボードの概念に向けて	5-7
(3) 処分場の変遷プロセスからストーリーボードへ.....	5-8
(4) ストーリーボード誕生へ.....	5-9
(5) 第二世代のストーリーボード	5-12
5.2 ストーリーボードの適用	5-17
5.2.1 余裕深度処分におけるセーフティケース構築とストーリーボード.....	5-17
(1) 余裕深度処分の概念	5-17
(2) 余裕深度処分におけるセーフティケース.....	5-18
(3) 閉鎖前の施設確認とストーリーボード	5-18
(4) 閉鎖後のセーフティケースとストーリーボード.....	5-26

(5) まとめと今後の展開	5-29
5.2.2 安全評価シナリオとストーリーボード	5-30
(1) 研究の背景：新しいシナリオ設定手法開発の必要性	5-30
(2) シナリオ解析のワークフレームの構築	5-30
(3) ストーリーボードの構築	5-38
(6) まとめと今後の展開	5-44
5.2.3 人工バリアの初期品質評価とストーリーボード	5-45
(1) 研究の背景	5-45
(2) 人工バリアの長期挙動評価の着眼点	5-46
(3) 人工バリアの長期変遷予測へのストーリーボードの導入	5-47
(4) 安全評価の前提となる状態変化の分析	5-48
(5) 人工バリアの品質確保の方策	5-51
(6) ベントナイトの特性に着目した影響因子の時系列的変遷分析	5-52
(7) まとめと今後の展開	5-56
第 6 章 まとめと今後の展開	6-1
6.1 研究のまとめ	6-1
6.2 今後の展開	6-6

第1章 序論

1.1 研究の背景

放射性廃棄物は、核物質として原子力エネルギーが利用された段階から発生している。1960年代には放射性廃棄物は、放射能のレベルのみ着目され、毒性が長く続くという認識はされておらず、雨の少ない砂漠にトレンチを掘削して簡易な形で埋設された。例えば、写真に示す米国のアイダホ州での処分方法もその代表例である。一方で、放射能レベルが高いとされる放射性物質は、硝酸で溶解され、施設内に設置された鋼製貯蔵タンク内に将来の処分場が決定されるまで保管されていた。



写真：1960年代の米国での放射性廃棄物処分の現状（Idaho National Laboratory より提供）

筆者らは、簡易に処分された放射性廃棄物の影響問題に直面しているアイダホ国立研究所からの依頼があり、2001年から共同で問題解決のための研究に着手した（第4章参照）

1970年代に入り、このようなレベルの高い放射性廃棄物の処分のあり方について、国際的な議論が開始され、安定した地下深部に埋設する地層処分(Geological disposal)の概念が各国で選択されるようになった。米国では、1970年代後半から原子力の軍事利用から発生する長寿命核を含む廃棄物（TRU 廃棄物）を地下深部に処分するプロジェクト（Waste Isolation Pilot Plant :WIPP）が開始され、1980年代初頭にニューメキシコ州カールスバッドに分布する岩塩層を選定し、1983年から処分場の建設が開始された。WIPP は 1999 年に廃棄物が搬入され、運転が進められている世界で唯一の地層処分場である。この処分場の初期の建設プロジェクトに日本の企業がコントラクターとして参画したことはあまり知られていない。

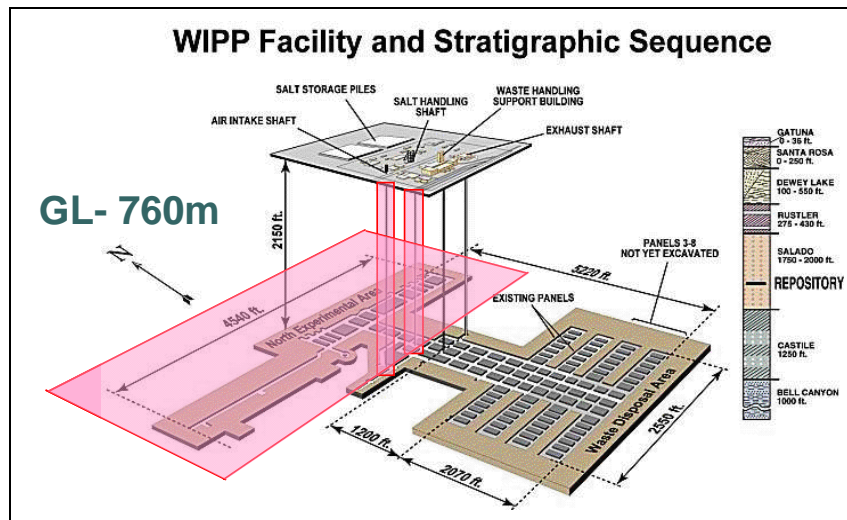
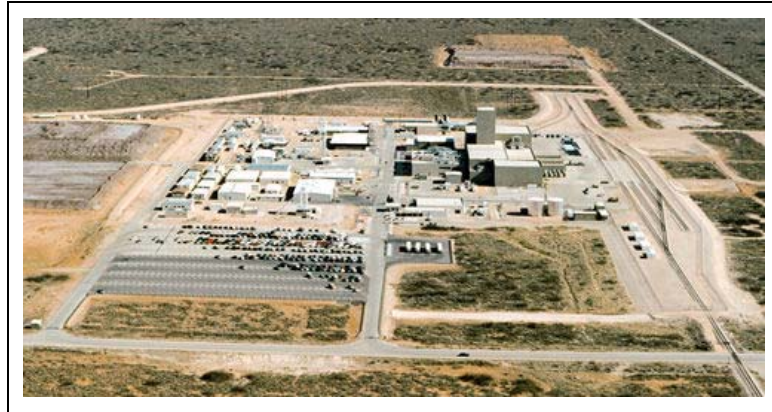


図 1.1-1 WIPP の全景と地下処分場の俯瞰図（ピンク色部分を日本の建設業者が施工）：

本論文の一部である閉鎖前の安全性確保の理念は WIPP 建設で米国エネルギー省から要求された品質保証と安全性の要件から学び取った大きな教訓である（第 3 章）

放射性廃棄物の地層処分プロジェクトは、WIPP を除いて多くの国が処分候補地の選定を含めて多くの課題に直面している。その最も大きな問題は、処分の安全性に関する理解を得ることの難しさである。地層処分の安全の基本理念は、パッシブ・セーフティ（受動的安全性：制度的管理や人間の関与によらない安全確保）としていることもあり、また、放射性廃棄物そのものへの潜在的な恐怖感も含めて、処分への不安感がぬぐえないためである。

パッシブ・セーフティの正当性を示すために、多くの研究が実施されてきた。その代表的なものが「安全評価」である。安全評価は、設定した安全概念の将来的な変遷を考慮し、埋設された放射性核種の地表までの移動と人間への放射線学的な影響を定量的に評価するものである。評価に用いられる手法には、放射性物質が人間に達するまでを記述する「シナリオ解析」とその放射性物質が人間に与える影響をモデルで評価する「影響解析」がある。いずれも高度な専門知識に

基づき開発されてきた。このような安全評価の結果は、例えば、図 1.1-2に示すように、数 10 万年以降に被曝線量としてのピーク値が示され、その値が安全基準値を満足することで処分の安全性が説明されている。この図はスイスの放射性廃棄物処分の実施主体であるNagraが 2002 年に公表したもので、図中の黒の実線がHLWを対象とした基本シナリオでの解析結果を示す。

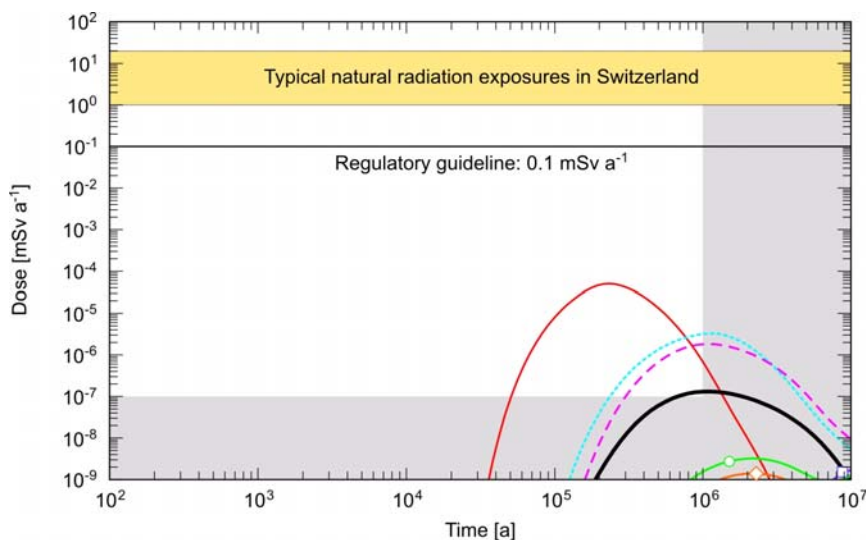


図 1.1-2 地層処分の長期安全性を示す「安全評価」の結果例（Nagra EN2002）

地層処分プロジェクトが、研究成果や工学技術を用いてその実現性を示す段階からサイト選定という事業段階に移行するにつれ、規制側が要求する長期の安全性を示すだけでは、その他の多くのステークホルダー（処分事業にかかわる人々：地域の住民や為政者、電気事業者、学識経験者、立法府、司法など）の理解と受容れを得ることが困難になってきた。その大きな理由は、定量化を主目的とした評価では、長期の挙動予測をモデルで行うため、限られた知見と情報のための仮定と単純化が不可避であること、数 10 万年でのピーク値結果は、直接的にその正当性を検証することができないことにある。

なぜこの仮定や単純化のプロセスが妥当なのか、安全性を検証する他のエビデンスや指標はないのか、などの疑問に答えるために、2000 年代に入り、処分の分野に安全性を解析結果だけでなく総括的に論じる「セーフティケース」という概念が導入され、わが国でも積極的に用いる試みが始められている（詳細は第 3 章）。セーフティケースとは、安全に関する様々な角度からの論拠を集約したものという定義が一般的であるが、その内容や論拠とする事項についても、まだ多くの議論がなされている。しかし、これまでの専門家のみが議論していた科学的な安全評価中心のアプローチから、ステークホルダーの参加を含めての議論を通じて、処分の理解と受容を試みる新しいアプローチは、今後、処分の実現性の中核となることは明らかである。

1.2 研究の目的

本論文のテーマである「放射性廃棄物処分のセーフティケース構築におけるストーリーボードの適用性研究」では、放射性廃棄物地層処分が選択された歴史的背景とその安全確保の課題に基づき、科学を中心としたこれまでの安全評価のあり方に工学的なアプローチを加味し、社会・倫理的な側面を統合するセーフティケースの構築のために、新たに開発したストーリーボードを、実際の様々な放射性廃棄物処分プロジェクトに適用することで、その有効性の確認と処分の受容に向けて役割を確立することある。

(1) 対象とする課題

放射性廃棄物処分における最大の課題は、処分場の閉鎖後（人間の関与から手が離れたあと）10 万年以上におよぶ安全性の明示である。これを示すために安全評価という手法が用いられてきた。安全評価のアプローチは、放射性廃棄物が備える安全機能を「ある性能を持ったシステム」としてとらえ、将来のシステムの変化を予測し、モデル化することで定量的な影響を提示することにある。長期にわたる評価には、前述したように不確実性の存在が不可避となるため、時として悲観的で保守的な仮定やパラメータが用いられている。

定量的な安全評価は、FEP（Feature：特質、Event：事象、Process：プロセス）分析から開始され、安全概念に影響を及ぼすストーリーをシナリオとして構築することから開始される。FEP では処分の安全性に影響を及ぼすと想定される全ての因子が抽出されている。そこには、ミクロレベルの放射性核種の特性やプロセスから、気候変動やテクトニクスなど地球規模の事象やプロセスが含まれている。そのため、FEP を設定する段階で学際的な判断が必要とされ、その中身は FEP 辞書と呼ばれる高度な知識の集約となっている。このような FEP をベースに、将来発生するストーリーを評価のシナリオとして構築する作業は、膨大な作業となるため、安全評価の初期段階ですでに大多数のステークホルダーは理解することが困難となる。さらに、シナリオに基づき構築される評価モデルでは、高度な専門知識と判断が導入されているため、解析結果の解釈では、限られた専門家だけが理解できるレベルとなっている。このような結果を一般の国民に提示しても理解を得ることは、極めて難しい。

また、処分の安全評価では、放射性核種という目に見えない微小の放射性物質を評価の対象とする。具体的には、放射性核種はガラスやセメントで固化され、人工バリアと呼ばれる工学的な構造物と天然バリアと呼ばれる本来自然が有する物質を閉じ込める「安全機能」と呼ばれる性質

を活用することを基本としている。評価においてはミクロンレベルの大きさから、テクトニクスを論じるまで極めて広範囲な領域を評価の対象とする。また想定される変化や変質および反応は、ナノセカンドで終了するものから百万年にわたり継続する事象もあれば、火山や断層運動のように、突発的に発生する事象も存在する。

長期の安全性をセーフティケースを用いて論じるには、これらのスケールの異なる対象と時間枠を扱わねばならず、そこには時間・空間的に存在する不確実性への対応を考慮しなければならない。これらの議論は多岐の分野にわたる専門家間でのコンセンサスを得つつ進める必要があるとともに、そのプロセスや結果を他のステークホルダーに分りやすく説明するための手法の開発が不可欠となる。

(2) 課題解決に向けてのアプローチ

本研究では、安全評価が本質的に抱えるこれらの課題に着目し、セーフティケースをキーワードとして、以下に示す三段階で研究を取りまとめていく。

第一段階では、まず、放射性廃棄物処分が目指す安全概念と国際的に提唱されたセーフティケースという新しい概念との結びつきについて考察し、課題解決に向けての方策を提示する。

第二段階では、課題解決の方策の一つとして、工学の世界が提供できる処分場の閉鎖までのセーフティケースと科学の世界が適用できる処分場の閉鎖後のセーフティケースについてのこれまでの研究を取りまとめ、二つの安全性を統合化する方策を提案する。つぎに、セーフティケース構築に向けての課題解決方策として、工学的なアプローチと科学的アプローチ、および社会・倫理的なアプローチの具体例をこれまでの研究成果からとりまとめる。

第三段階では、統合化したセーフティケース構築の具体的なアプローチとして、処分で対象とするスケールの異なる領域と時間枠全体を俯瞰し、安全評価で扱う場の総合的な理解を図ることを目標に、科学・工学・社会学的を結びつける新しい手法（ストーリーボード）を提案する。ストーリーボードをわが国で検討されている放射性廃棄物処分プロジェクトに活用することで、開発目標としたプラットフォームとしての有効性やステークホルダー間のインターフェースとしての役割を確認する。

1.3 研究論文の構成

本研究論文は、セーフティケース構築におけるストーリーボードの適用性を確認することを目標として、図 1.3-1に示す三段階で構成される。

第一段階となる第2章では、まず、放射性廃棄物処分に関わる安全確保の基本的な考え方の歴史的な変遷と長期の評価にいたる流れを背景情報として調査・整理する。国際的な動向に沿ってのわが国で提案されている処分の概念と特徴を整理するとともに、2000年代に入り顕在化してきた安全評価上の問題点を掘り下げ、新しい概念であるセーフティケースの説明とその期待される役割を考察し、課題解決に向けての方策について言及する。

第二段階は、第3章と第4章で構成される。第3章では、処分全体を閉鎖前と閉鎖後に分け、それぞれについてのセーフティケースに関連するこれまでの研究の成果を取りまとめて、セーフティケース構築に必要な事項を抽出する。閉鎖前のセーフティケースとして、作業時の安全確保の具体策の研究例を示し、閉鎖後のセーフティケースとしては、長期の安全性の確信を得るための研究例を示す。セーフティケースを統合する研究例として、閉鎖前のアクティブな対応から閉鎖後のパッシブな状態に移行するために必要となる作業段階からの品質保証と長期の安全確保を結びつけた研究成果を提示する。第4章では、統合したセーフティケースの要素となる工学的なアプローチ、科学的なアプローチおよび社会・倫理的なアプローチについての具体的な研究成果を整理し、インターフェースとして必要となる事項を抽出する。工学的アプローチからは、科学との知見の融和と社会との接点も考慮し、長期貯蔵から処分までの裕度をもつ処分概念を提案する。科学的アプローチからは、科学的な評価の方法を分かりやすく示す手法の確立と将来予測の手法について、工学と社会との融合を考慮した研究事例を紹介する。社会・倫理的アプローチでは、ステークホルダーの参画を考慮した意思決定に適用できる手法開発の成果を記述する。

第三段階となる第5章では、本論文の主題である統合化されたセーフティケースを構築するための手法について、新しい概念とその適用例を記述する。セーフティケースの目標とする安全性への様々なアプローチを示すための出発点として、処分で扱う異なるスケールの評価対象と時間枠の全体が俯瞰でき、異なる分野の専門家が同じテーブルで議論できる新しい仕組みを構築する。本論文では、この手法を「ストーリーボード」と定義し、実プロジェクトへの適用例を示すことで、その有効性と役割を確認する。

第6章では、全体のまとめと本研究での成果の今後の展開を提示する。

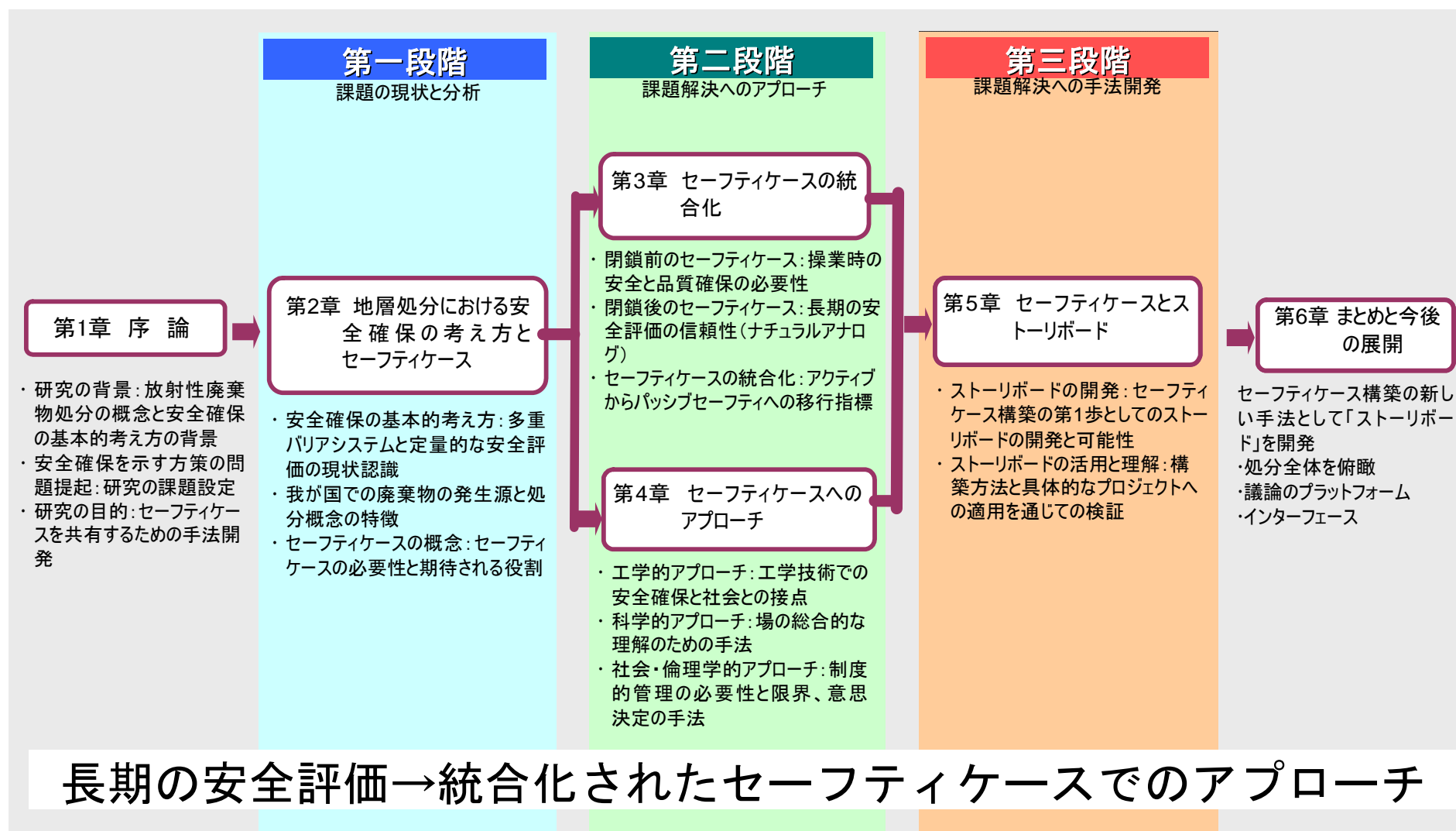


図 1.3-1 研究論文の構成

第2章 地層処分における安全確保の考え方とセーフティケース

放射性廃棄物処分の長期安全性をどのように確保し、評価するかについては、1970年代後半から議論され、1980年代に「安全評価」として確立された手法が広く用いられるようになった。安全評価は、長期の安全確保の方策を具現化した多重バリアシステム等の処分概念を対象に、システムの長期変遷を考慮し、放射性核種の人間環境までの挙動を「シナリオ解析」と「影響解析」で定量的に求め、規制側が要求する安全指標との比較を行う手法である（IAEA Working Glossary 2002）。

安全評価は、わが国を含め多くの国で、地層処分の実現性を示す最重要課題への対応として、長期の安全性を定量的に示す手法として確立されてきた。評価では、処分の安全確保のために考案された多重バリアシステムの性能を予測するために、評価のためのストーリーとモデルが準備され、解析のためのパラメータが設定された。これらの一連の作業では、適用できる知見や情報の制約から、専門的な判断に基づく単純化や保守的なアプローチが多く用いられた。

本章では、安全評価が生み出された歴史的な変遷と問題点を整理するとともに、2000年代に新たに提唱されたセーフティケースの概念を分析し、次章以降で取り扱うわが国での地層処分への展開を考察する。

2.1 地層処分の概念と安全評価

(1) 地層処分の安全概念

放射性廃棄物の地層処分に関連する国際機関での初期の議論としては、OECD/NEA（経済協力開発機構／原子力機関）が1977年に公表した“Polvani Report”がある（“Objectives, Concepts and Strategies for the Management of Radioactive Waste Arising from Nuclear Power Programmes”）。Polvani 報告書では、レベルの高い核分裂生成物を多く含む放射性廃棄物（高レベル放射性廃棄物あるいは HLW: High-level Waste）を処分するには、人間の関与から隔離できる地層処分が最も有効な手段であることが勧告された。さらに、高レベル放射性廃棄物は時間の経過とともにその毒性が減衰する特徴があり、その特性を踏まえた処分方式を選定することも提案されている。

1982年にOECD/NEAの専門家グループは、“Coady Report”（“Disposal of Radioactive Waste: An Overview of the Principles involved”）において、放射性廃棄物処分が目指すゴール

として、以下の事項を提唱した。

- ・ 人間の健康の防護：放射線被曝による影響を評価することで判断
- ・ 環境の防護：放射線影響に敏感である人間を防護することで実現。生態系への影響はモニタリング等の結果で判断
- ・ 将来世代への責任：将来世代への負担をできる限り小さくするために、原子力エネルギーの恩恵を受けた世代が責任を持って廃棄物の対策を講じ、処分することで将来世代が受ける可能性のあるリスクは、現世代が受け入れているレベル以下とすること

これらのゴールとして示された理念は、その後、IAEA（国際原子力機関）が1989年に公表した「高レベル放射性廃棄物処分に関する安全原則」として初めて包括的にとりまとめられた基準である”Safety Principles and Technical Criteria for the Underground Disposal of High Level Radioactive Wastes、Safety series No.99”に引き継がれている。この安全原則で提唱された事項の一つに、「処分場の閉鎖後の安全性は、モニタリングや監視、および制度的管理や修復行為に依存してはならない：原則2」がある。記述された解説では、本原則に対応する安全確保の方策を「パッシブ・セーフティ」という用語で説明している。パッシブ・セーフティは、長期の安全性確保の基本であり、この基本を実現するために人間の関与に依存しない安全確保のシステムの構築を要求している。

この要求は、我々が実社会で対応している工学的なアプローチ（モニタリングや監視による維持管理や修繕など）や社会的な仕組み（法律による処分場の制度的管理）に依存しない安全方策を求めていることになる。処分の安全評価では、このようなパッシブな仕組みが有するシステムの性能（performance）を評価するための科学的な知見の蓄積と解析手法の確立に焦点があて開発されてきた。

処分場の閉鎖後に着目した放射性廃棄物処分における長期の安全評価については、1983年に米国のNRC（National Research Council）が公表した”A Study of the Isolation System for Geologic Disposal of Radioactive Waste”が、現実のサイトを対象に被曝線量の解析を実施した最初の安全評価書といえる。評価書では、地下深部に埋設された放射性物質は、地下水に溶け、地下水の流れとともに最終的に地表の人間環境に放出される仕組みを基本シナリオ（最も蓋然性の高いシナリオ）として評価が実施されている。このような評価の中で、現在我々が地層処分の安全評価で用いている多くの専門用語が定義された。例えば、人工バリア(Engineered Barrier)、天然バリア(Natural Barrier)、生物圏(Biosphere)、移行(Migration)、性能評価(Performance)

Assessment) 等の新しい用語が定義されている。その中で、特に放射性核種の人間環境への放出を削減するメカニズムについて記載された以下の事項は、現在でも安全評価における安全機能 (Safety function) として広く認識されている。

- ・ 処分場への地下水浸入の抑制
- ・ 放射性核種の地下水への溶解速度の抑制
- ・ 廃棄物容器からの放出の抑制 (閉じ込め性)
- ・ 地下水流動距離の長さの確保による核種の移行時間の抑制
- ・ 地層内での核種の収着による移行抑制
- ・ 核種濃度の分散および希釈

米国での安全評価書に引き続き、スウェーデンではSKB (スウェーデン原子燃料廃棄物管理会社) が 1983 年に使用済み燃料を対象とした包括的な安全評価書KBS-3 を公表した。またスイス Nagra(放射性廃棄物管理共同組合)は、1985 年に放射性廃棄物処分に関する安全評価書 (Projekt Gewähr 1985) を公表した。これらの報告書で提示された処分場の概念および安全評価の手法は、わが国における高レベル放射性廃棄物処分の概念構築と安全評価に大きな影響を与えた。例えば、1999 年に核燃料サイクル開発機構 (現在「原子力研究開発機構：以下原子力機構」) が公表した「わが国における高レベル放射性廃棄物処分の技術的信頼性 (第 2 次取りまとめ)」での標準的な処分概念は、SKBが提唱した処分孔縦置き人工バリアシステムとNagraが提示した処分坑道横置きの人工バリアシステムを参照している (図 2.1-1)

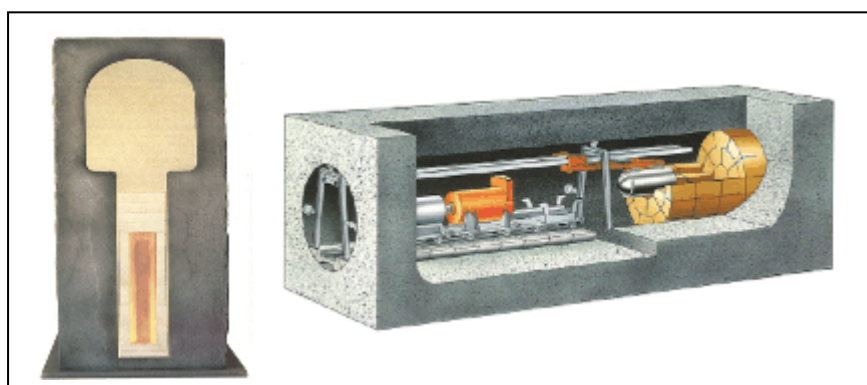


図 2.1-1 人工バリアの定置概念 (左 : SKB KBS-3 概念、右 : Nagra Gewähr 概念)

また、スウェーデン、スイス両国で用いられた安全確保のための多重バリアシステム概念 (Multi Barrier System Concept) は、地層処分における安全確保の概念 (Safety Concept) と

して広く認知されるようになった。動力炉核燃料開発事業団がわが国で最初に処分概念と多重バリア概念を提示した第1次取りまとめでは、図 2.1-2に示すProject Gewährで提示された多重バリア概念を参考にしている。

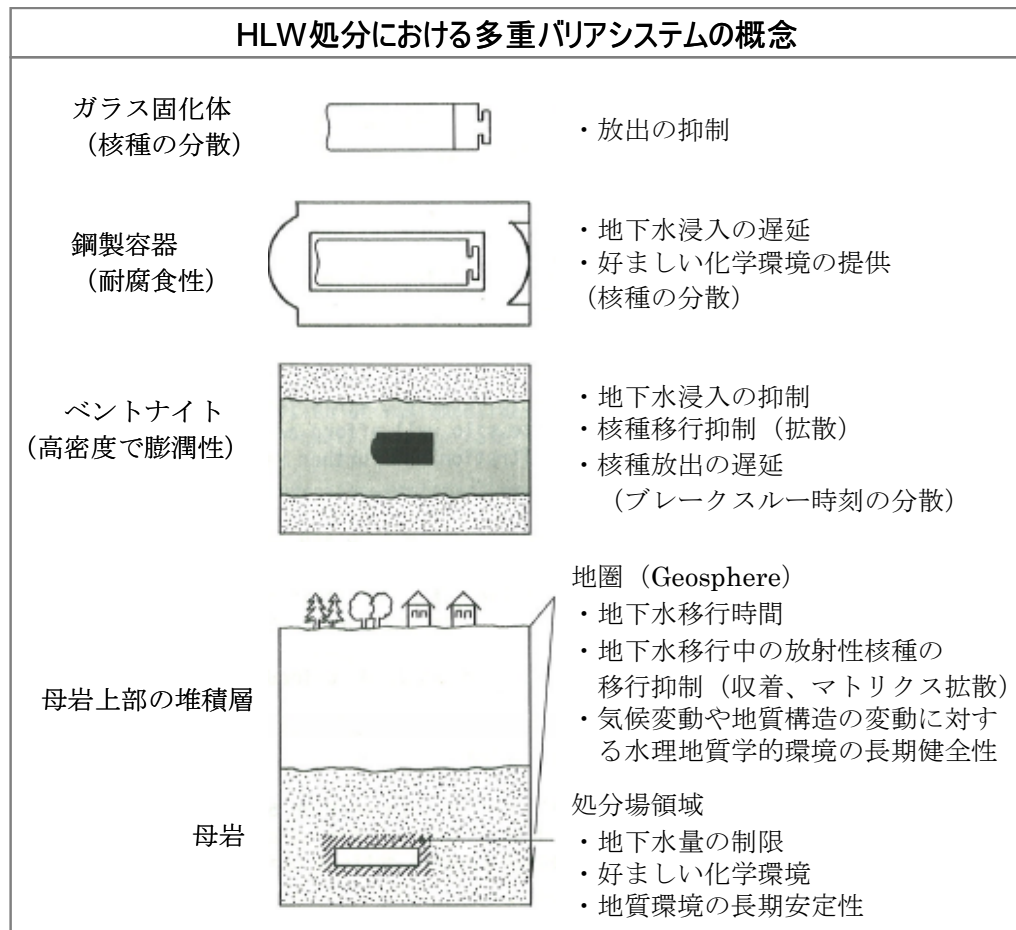


図 2.1-2 Project Gewähr (1985)で示された多重バリアシステムの概念

1980年代後半に、国際機関で多く議論された安全評価に係る課題には、上記の米国、スウェーデン、スイスでの包括的な安全評価書作成が大きな影響を与えている。1990年にパリでOECD/NEAが開催した”System Performance Assessments for Radioactive Waste Disposal”の安全評価の専門家ワークショップでは、以下に示す課題が今後研究の必要な項目として整理された。

- ・ 安全目標と安全評価のリンク：規制目標値との安全評価によるコンプライアンスの示し方
- ・ 個々のプロセスモデルと統合したシステムモデルのリンク：モデル間の整合性の確保

- ・ モデル開発と野外や室内での調査・実験結果とのリンク：モデルの確証方法

これらのリンク相互の相関について、図 2.1-3に示す。

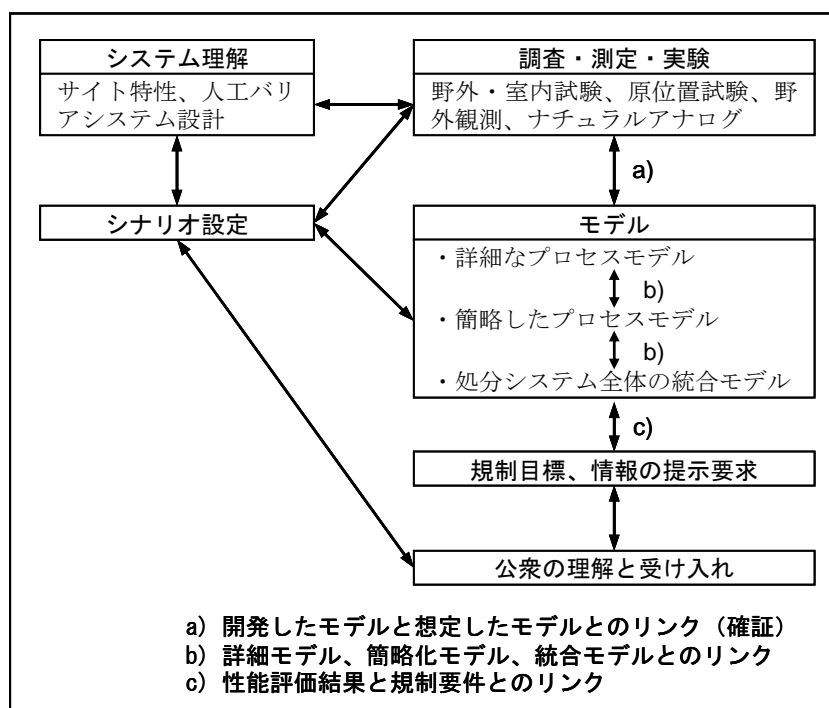


図 2.1-3 処分システム性能評価の各要素間リンク (OECD/NEA 1990)

リンクにおいてはシステム理解が出発点であり、そのための科学的な根拠の準備やモデル・パラメータ開発の必要性が実証とともに強調されることで、これらを通じて公衆の理解と受容が得られるとした。その背景には、安全評価の結果を直接的に実証することは不可能であるため、評価の結果にいたるプロセスや手法の妥当性を示すことで評価結果の信頼性を得るという戦略があった。

1980 年代後半から 1990 年代に至るまで、各国で処分の実現性を明示する安全評価書が公表され、国際機関での議論においても安全評価を通じて浮かび上がってきた課題を解決することに重点がおかれてきた。また、上記に示したワークショップで推奨された安全評価の方法や課題解決方策は、その後 10 年以上にわたり、放射性廃棄物処分に関わる各国の専門家間での共通認識となった。特に安全規制としての要求が被曝線量値やリスクレベルといった定量値で規定されたこともあり、処分の実現性を示すために科学的なアプローチによる安全評価を中心とした進め方が主流となった。

(2) 安全評価の課題

1990年代の後半から、放射性廃棄物地層処分の実現に向けて、多くの国が処分場のサイト選定に本格的な取り組みを開始した。選定においての主題は、サイト固有の条件下での長期の安全性をどのように示すかに集約されていた。実際、事業主体がサイト選定に臨む時に直面した問題は、科学的な観点からの安全性の提示よりも、地層処分事業の安全性や人間の関与に依存しないとするパッシブな安全理念に対する信頼性を、どのように具体的に構築しそれを説明するかであった。このような課題は各国で共通な問題として認識され、OECD/NEA が 2004 年に取りまとめで公表した “Learning and Adapting Societal Requirements for Radioactive Waste Management” では、以下の事項が処分に係る人々（ステークホルダー）の理解を得るために不可欠であることを示唆した。

- ・ 放射性廃棄物に関する対応策をステークホルダーが受け容れやすいものとする
- ・ 意思決定のプロセスを準備する
- ・ 社会的・倫理的な尺度を準備する
- ・ 処分の責任主体の信頼性を高める
- ・ 意思決定にステークホルダーの参画をはかる
- ・ 地域にあった放射性廃棄物対策とする

上記の事項の中で強調されていることは、事業主体は処分の実現に向けての信頼性の醸成（コンフィデンス・ビルディング）を図るには、まず処分事業としての信頼性と安全性を明示するとともに、工学・科学的なエビデンスを可能な限り準備する。さらに、長期の評価には科学と工学だけでは対処できない不確実性が存在することを理解してもらうために、社会・倫理的な対応策と共に、ステークホルダーとのコミュニケーションの場を準備することである。具体的なアプローチについて、提唱された文脈から筆者が読み取ったメッセージは、以下のとおりである。

- ・ 安全評価などの定量的な解析結果だけでなく、自然界に存在する類似の現象で説明するナチュラルアナログなど、内容を理解するためのエビデンスを準備する
- ・ 事業の進め方に段階的な意思決定プロセスを導入し、ステークホルダーに参画させる仕組みを準備する
- ・ 処分場を人間の手から離すまでの管理を科学・工学的な観点だけでなく、社会・倫理的な価値観も含めて考慮できる制度を準備する

前述したように、2000 年に入り、1980 年代から準備されてきた定量的な安全評価だけでは、特に地域の為政者や住民といったステークホルダーの理解と受け入れが困難であることが各国で認識されてきた。安全評価には、多くの仮定と専門家の判断が導入されており、それらを論理立てて説明することは極めて困難であること、評価結果が数 10 万年後の潜在的な被曝線量やリスクで示されるため、多くのステークホルダーにとって実感が持てないこと、評価に将来予測の側面が入るため、その解釈に関する合意と理解を得る十分なエビデンスやロジックが準備されていないこと、などが背景として考えられる。特に、将来予測に不可避な不確実性の存在を認識として共有することの難しさがあり、そこには科学的なアプローチだけでは乗り越えられない問題点があることが明らかになってきた (OECD/NEA Safety Case working group)。これらの問題点は、2000 年に原子力安全委員会が公表した「高レベル放射性廃棄物処分に関する安全の基本的考え方 (第 1 次報告)」にも記述されている。

(3) セーフティケースの誕生

このような問題点に対し、IAEA や OECD/NEA においても世界各国の共通課題として、安全評価中心の進め方から、処分事業の進展に対応した新しい安全性を示す枠組みを構築するためのアプローチが議論されてきた。その代表的なアプローチが「セーフティケース」の構築である。OECD/NEA が 2004 年に公表したセーフティケースの定義を以下に示す。多くの場合、安全評価とセーフティケースというように併記されて説明されている。この併記は、両者の違いを示すのではなく、それぞれの役割を示したものと解釈している。

Box 1: Definitions of safety assessment and the safety case

From: IAEA/NEA draft Safety Requirements for Geological Disposal, DS154, 2004[6].

Safety assessment is the process of systematically analysing the hazards associated with the facility and the ability of the site and designs to provide the safety functions and meet technical requirements.

The safety case is an integration of arguments and evidence that describe, quantify and substantiate the safety, and the level of confidence in the safety, of the geological disposal facility.

本定義で示されたセーフティケースは、「処分施設の安全性に関する信頼性のレベル、および安全性を定量化し、実証するための議論とエビデンスを統合化するものである」と記述されている。

英語での定義そのものがかなり難解であり、わが国で議論されるときは例えば、「安全性の論拠」と訳されていることが多い（第 3 章にセーフティケースに関する考察を記述）。セーフティケースとは、処分の安全性を示すために、あらゆるアプローチや方法論、エビデンスや実験結果、および専門家の知見を集約するものとして理解している。つまり、従来の多分野にわたる学際的な安全性の明示のみならず、安全に品質の良いものを作るという工学的なアプローチと社会との接点を重要視する取り組みの統合化が求められている。

(4) 地層処分の安全確保の基本的考え方

地層処分の安全概念の構築の歴史とその評価手法の開発の経緯、および新たなセーフティケースの概念について調査結果をまとめてきた。本節では、それらの知見に基づき、わが国での地層処分での安全確保の基本的考え方について整理する。

数 10 万年以上にわたる毒性を有する放射性廃棄物の安全確保をどのように考えるか、どのような方策を採れば将来世代に負担をかけることなく実現できるかの命題に対し、我々世代が共通して選択したのが地層処分という概念である（IAEA Safety Standard 1989）。長期にわたる挙動の中で最も予測の不確実性が大きいのは、人間が関与する事象であることは歴史的に自明といえる。これまでの人類の歴史からみて、数万年後にどのような社会になっているのか、その間に何が起こるかは 100 年先でも予測は不可能である。この意味で長期の安全確保に人間を関与させることは、将来の世代に負担をかける可能性が極めて高いと判断せざるを得ない（安全確保の原則 2 : IAEA Safety Standard 1989）。

また、多くの自然現象（台風、洪水、地すべり、地震、火山爆発など）では、人間が住む地表が最も大きな影響を受けてきた。一方で、地下深部ではこれらの影響が小さく、断層活動や火山活動の可能性ある地域を除外すれば、長期にわたり安定した環境となることが知られている（原環機構、概要調査地区選定における考慮事項、2002）。最も不確実性の高い人間とその生活環境から安全に隔離することは安全機能の一つとして重要な要素であり、地下深部への処分を選択する大きな理由の一つである。このことは、演繹的な思考から導きだされる回答であり、各国の処分概念の選択の中で広く受容られている。

もう一つの理由は、地下深部の大地が本来有する特性の活用である。地下深部に放射性廃棄物を埋設した場合でも、長期の時間とともに廃棄物が周辺の地下水に溶解し、地下水の流れとともに人間の生活する環境に戻ってくる可能性は否定できず、その場合の影響を評価しなければならない。このような評価のためには、処分する地下深部の特性と廃棄物を地表まで運搬する地下

水の性質、および経路の特性について把握し、定量的に評価することが処分の実現に際して要求される。これまでの研究から、地下深部の特性として、地下水の移動する速度が地表面に比較して極めて遅く、また化学的な活性度も低く、放射性核種が溶け出す量を抑制する働きが期待できるとともに、その経路においても地層が本来する物質の移動を抑制する効果も期待できるとされている。これらの地質環境が本来的に有する性能は「核種の閉じ込め機能」、「核種移行を遅延する機能」、「核種濃度を希釈する機能」と分類されている（OECD/NEA, Long term Safety of Geological Disposal1985）。

このように、我々世代が選択した地層処分の安全確保の基本理念は、人間の関与に依存することなく、また長期にわたるさまざまな外乱に対する緩衝性を有し、地下深部の特性をそのまま利用することを目指した形態である。そして、安全性を更に確実なものとし、地層処分が可能となる立地の選択の幅を広げるために、工学的な対策として人工バリアを設置することが考案され、その具体化と具備すべき機能および長期の性能を評価する研究が進められている。放射性廃棄物の熱特性から、廃棄物は適切なスペースにおいて埋設する必要がある、処分に必要な母岩の広さは、廃棄物の量にも依存するが数キロメートル四方と推定されている。このような範囲では、地層の特性はばらつき、また物性によっては異方性、不均一性を示すことが知られており、全てを把握することは現状技術では極めて困難である。このような空間的な不確実性に対応するためにも、人工バリアが有するさまざまな緩衝性が重要な役割を果たすことになる。

即ち、地層処分の安全概念は、地層が本来有する特性と工学的な対策を組み合わせた処分システムとして、人間が関与せず長期にわたり安全性が確保されることを目指したものである。

一方、処分システムに人間が関与できることは、処分に適した地層を選択することと、地下深部の特性に対応した廃棄物を定置する空間と人工バリアを設計すること、そして設計に従って建設・操業・埋め戻しすることである。さらに、処分システムとしての安全確保方策の長期の性能を予測することも我々の世代が責任を持って行わなければならない行為である。これらの一連の作業そのものが、人間が直接関与できる様々な「行為」である。これらの行為には、設計や建設などの工学的なアプローチ、地質環境（地質・地質構造、水理地質、地科学、力学）を調査・評価し、将来の変遷を予測する科学的なアプローチ、法律や規制で処分場の運営を制度的に管理する社会的なアプローチ、および将来世代への負担と影響を最小とする倫理的な側面が含まれる。

2.2 放射性廃棄物と処分概念

(1) 放射性廃棄物の発生源

わが国における放射性廃棄物は、原子力エネルギーの利用から発生する。その種類は、放射能レベルにより分類されている（図 2.2-1参照）。このうち、特に放射能レベルが高く半減期が長い廃棄物を高レベル放射性廃棄物（HLW: High Level Waste）と分類している。わが国におけるHLWは、原子力発電所の使用済み燃料を再処理したガラス固化体の形で存在する。処分の対象となるガラス固化体は、2030 年までに約 4 万本発生すると予測され、30 年から 50 年間かかる冷却のための中間貯蔵が進められている。さらに再処理や原子力発電所の解体、発電所の運転からは、放射能レベルは低いものの寿命が極めて長い廃棄物（わが国ではTRUと総称している）、および低レベル放射性廃棄物（LLW: Low Level Waste）と分類される廃棄物（放射能レベルによりL1、L2、L3 に分類）が発生する。また、研究、医療、産業活動からもRI廃棄物と総称される低レベル放射性廃棄物が発生する。

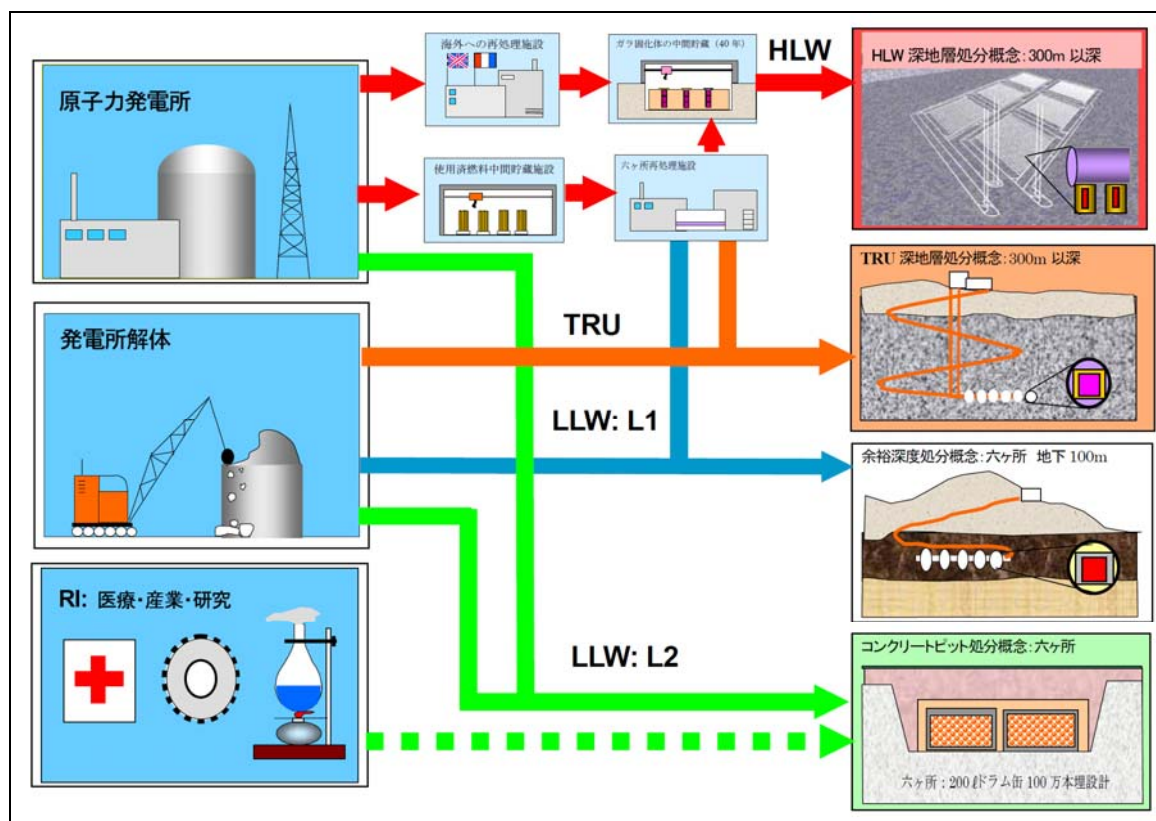


図 2.2-1 わが国での放射性廃棄物の発生源と処分場概念

(2) 安全確保の方策と処分概念

現状わが国での放射性廃棄物の処分概念は、図 2.2-1に示す4種類存在する。このうち、L2 と分類されるLLWは、コンクリートピット処分と呼ばれ、既に青森県六ヶ所村で埋設事業として処分が開始されている。また、L3 と分類されるLLWは、図に概念は示されていないが極低レベル放射性廃棄物として茨城県東海村においてトレンチ処分の名称で処分が進められている。HLWとTRUについては、その毒性が長く継続するため長期の隔離が必要とされるため、地下 300m以深の地下深部に処分する地層処分の概念が選択されている。また、比較的レベルの高いLLWとして分類されるL1 廃棄物は、地表から 50m以深の人間活動から余裕を持って隔離できる浅地中処分の概念（余裕深度処分という名称）で、計画が六ヶ所村での立地を前提に進められている。

地層処分の技術的な実現性については、核燃料サイクル機構（現在日本原子力機構と改名）が 1992 年に公表した「高レベル放射性廃棄物地層処分の技術報告書（第一次とりまとめ）」と 1999 年に公表した「わが国における高レベル放射性廃棄物処分の技術的信頼性」の報告書に記述された。これらの報告書で示された地層処分の概念は、諸外国と同様に「安定した地質環境に人工バリアと天然バリアとを組み合わせた多重バリアによる安全確保」を基本としている（図 2.2-2参照）。

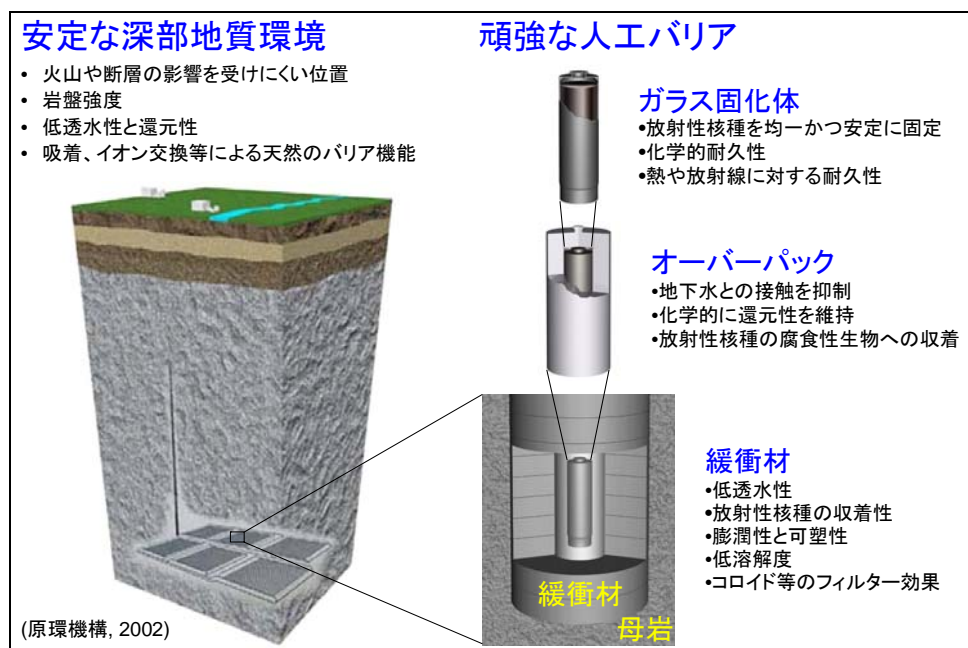


図 2.2-2 わが国における地層処分の概念と安全確保方策（原環機構, 2002）

2.3 セーフティケースの概念

1970年代後半に提唱され確立されてきた安全評価による長期の安全性を示す方法は、多重バリアのシステムとしての性能を評価する方法として、スウェーデン KBS-3、スイス Projekt Gewähr 1985、日本第2次取りまとめ等多くの国で実施されてきた。安全評価では、まずシステムの変遷と放射性核種の移行プロセスをシナリオとして記述し、シナリオに対応するプロセスをモデル化するとともに関連するパラメータを設定することで、人間に対する放射線学的な影響を定量的に求めることを基本としている。いずれも放射性廃棄物の地層処分の長期安全性確保の実現性を示す目的で、主として科学的なアプローチが中心となり実施されてきた。スウェーデンとスイスの場合は、特に原子力発電所の継続した運転認可を得るための条件として、国内での地層処分の実現性を提示することが求められ、その結果は議会で承認を受ける形で正当化された。わが国では、第2次取りまとめを抛り所にして、高レベル放射性廃棄物処分に関する法律と事業主体が 2000年に設立されている。

1990年代後半から、放射性廃棄物（特に高レベル放射性廃棄物）処分事業の実現に向け、各国の実施主体はサイト選定への本格的な活動を開始した。その活動の中で、以下に示す2つの課題が顕在化してきた（OECD/NEA 2004）。

- ・ 処分概念が技術的にも経済的にも安全にかつ高品質で実現できるか
- ・ 安全評価の結果で多くのステークホルダー、特に地域の為政者や住民の受容を得ることができるか

前者の課題は、処分場や人工バリアを、所定の品質と安全性を担保して設計・建設・操業する技術が準備できているかという命題に置き換えられる。特に安全と品質確保に係る技術は、長期評価の前提となるだけに重要視される。このような技術は、許認可を受ける段階までに開発され、所定の手順とサイクルタイム（工程管理）で、作業時の安全性を確保しつつ目標とする品質が達成できる技術が経済的に準備できていることを処分場と同じ環境で示すことが必要である（電気事業連合会、2000年）。

後者の課題は、従来の安全評価の不十分さを認識することから問題が提起されている。長期の評価には不確実性の存在が不可避で、それらを含めて定量的に解析することは、高度な専門的判断と過度の保守性や単純化が発生する（OECD/NEA 2004, 原子力安全委員会 2006）。これらの判断の根拠や保守性を選択した理由を理解し、合意を得ることは専門家間でも難しく、地域の意

思決定者にとっては容易なことではない。理解できないことに対する不信感や不安感が自然に生じることは避けることはできない。地層処分の実現性を示す段階で用いられてきた安全評価手法は、その実現に向けて一步を踏み出した瞬間に、新たな課題に直面したといえる。

上記 2 つの課題を分析した結果、共通する対応が示唆されたので以下に述べる。まず、ステークホルダーから求められる放射性廃棄物処分の安全性については、規制側が要求する年間の個人被曝線量等の長期の放射線学的な安全目標の達成を安全評価で定量的に示すだけでなく、用いられる仮定や専門家の判断を分りやすく説明することが求められる。そのためには、多方面にわたるエビデンスとそれらを結びつけるロジックを準備する必要がある。さらに、実施主体は、処分を安全に実現できる技術力（調査、評価、建設、操業、閉鎖など）を保有していることを、実証等の活動を通じて情報発信しなければならない。

OECD/NEA のワーキンググループは、特に最初の課題に対する対応として、「セーフティケース」という概念を提唱した（2004）。セーフティケースの語源は、英国の鉄道会社が鉄道事業の安全性を向上するために講じた対策として知られている。鉄道利用者および経営者・監督官庁に、鉄道の安全性を説明するために、様々な対策（信号システム、運転士の安全教育、メンテナンスなど）が準備され、それらを総称してセーフティケースと呼ばれたといわれている（ITC, 2004）。また、「ケース」の語源として、裁判における論証がそれにあたるとされている。裁判では裁判官や陪審員に対し、弁護士と検事が無罪、有罪に向けての様々な角度からの証拠を用いて論争を行うことになる。このような行為そのものがケースと呼ばれるようである。

一方、放射性廃棄物処分におけるセーフティケースの定義は、広く OECD/NEA が 2004 年に公表した図 2.3-1 が持いられている。（サイクル機構が第 2 次取りまとめで和訳）

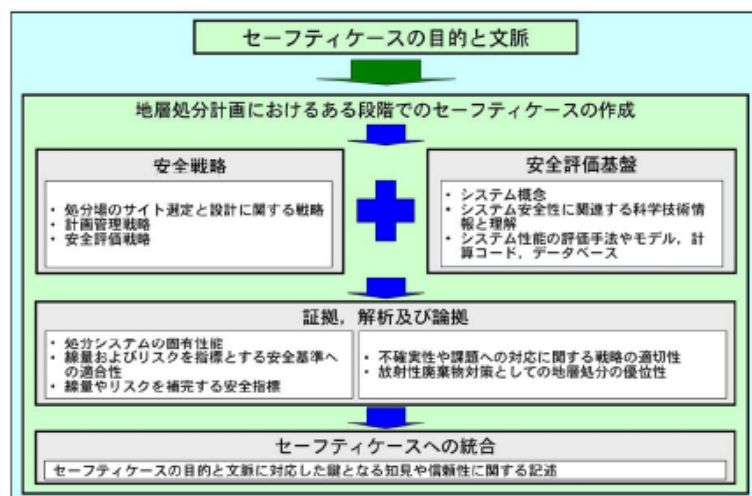


図 2.3-1 セーフティケースの要素と枠組み（OECD/NEA 2004 を JNC が和訳）

OECD/NEA の提言によれば、セーフティケースは処分事業の各段階で安全戦略を構築し、対応した評価の基盤を準備し、評価においては、エビデンス、解析および関連する議論を実施し、両者の整合性を確保することでセーフティケースが構築できるとしている。NEA のワーキンググループは、従来の安全評価を担当してきた専門家で構成されていることもあり、図 2.3-1 に示された枠組みは、安全評価を中心に、その正当性をさらに説明するためのエビデンスとロジックを追加する図式である。しかし、このような図式でのセーフティケースの概念の説明では、さらに混迷を招きやすいと思われる。Context（文脈）とされているセーフティケースの主題（セーフティケースとしてどのような内容を実施するか）もステークホルダーへの説明性を欠いている。前述の課題に対する回答としては安全評価への対応だけで、事業主体としての責任を果たすには不十分である。

IAEA は規制の観点から処分実施主体に 2 種類のセーフティケースの構築を安全要件として勧告した（IAEA2007）。一つは閉鎖前のセーフティケースであり、もう一つは閉鎖後のセーフティケースである。閉鎖前のセーフティケースは、処分場の建設・操業・埋戻し時の作業と放射線安全性に着目し、閉鎖後は長期の安全性に着目している。このような分割されたセーフティケースの要件は、規制の観点から重要かもしれないが、ステークホルダーにとっては、誤解を招きやすい考え方である。前述したように、セーフティケースは 2 つの課題に対して答える必要がある。

処分の安全確保に関する基本的な考え方は、前述したように人間が容易にアクセスできない安定した地下深部に廃棄物を埋設し、制度的管理や人間の管理に依存しないパッシブな安全確保の方策を採ることにある。人間が関与するアクティブな状態からパッシブな状態に移行する意思決定に着目すれば、閉鎖後の安全評価だけでなく、アクティブな作業段階でのセーフティケースの構築が重要で、閉鎖後のセーフティケースにつながっていくことがわかる。

次章では、このような閉鎖前のセーフティケースとしてわれわれが直接対応できるケースと閉鎖後の長期のセーフティケースとのつながりを「セーフティケースの統合化」とし、それぞれのセーフティケースでの着眼点について研究成果を用いて具体的に示すとともに、統合したセーフティケースのあり方について言及する。

【参考文献】

- 1) OECD/NEA (1977): Objectives, Concepts and Strategies for the Management of Radioactive Waste Arising from Nuclear Power Programmes, Polvani Report”
- 2) OECD/NEA (1982): Disposal of Radioactive Waste : An Overview of the Principles involved, Coady Report”
- 3) IAEA (1989): Safety Principles and Technical Criteria for the Underground Disposal of High Level Radioactive Wastes、 Safety series No.99”
- 4) US NRC (National Research Council) (1983): A Study of the Isolation System for Geologic Disposal of Radioactive Waste
- 5) SKB (1983): Final Storage of Spent Nuclear Fuel KBS-3
- 6) Nagra (1985): Projekt Gewähr 1985 Nuclear Waste Management in Switzerland: Feasibility Studies and Safety Analysis
- 7) OECD/NEA (1990): System Performance Assessments for Radioactive Waste Disposal, Workshop in Paris
- 8) OECD/NEA (2004): Learning and Adapting Societal Requirements for Radioactive Waste
- 9) ITC (2004): Lecture “Geological disposal and Safety Case” in Tokyo
- 10) 原子力安全委員会(2000)：高レベル放射性廃棄物処分に関する安全の基本的考え方（第1次報告）
- 11) OECD/NEA (2004a): Post closure safety case for Geological Repositories, Nature and Purpose, ISBN 92-64-02075-6
- 12) 原環機構(2002)：概要調査地区選定上の考慮事項、高レベル放射性廃棄物の最終処分施設設置可能性を調査する区域の公募関係資料-3
- 13) サイクル機構(2005)：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成17年度取りまとめ 総論－

第3章 セーフティケースの統合化

本章では、地層処分のセーフティケースの統合化に関連する研究成果を記述する。まず、閉鎖前のセーフティケース構築にかかわる研究として、

- ・ 処分場の操業時の安全性と品質確保に関する研究
- ・ 人工バリアシステムの高度化に関する研究

を取り上げる。操業時の安全性と品質確保に関する研究では、第2次取りまとめで示された処分場と人工バリア概念をベースに、地下施設での操業手順を考慮し、閉鎖前のセーフティケースを構築する上での安全性と品質確保に関する要件を抽出している。人工バリアシステムの高度化に関する研究では、閉鎖前のセーフティケースの高度化を図る目的で、より現実的で説得性のある人工バリア概念開発を目指した。

閉鎖後のセーフティケース構築に関する研究としては、

- ・ セーフティケースとナチュラルアナログ

を取り上げた。閉鎖後のセーフティケース構築では、時間の経過と空間の広がりを考慮した長期の予測に伴う不確実性への対処が最も大きな課題となる。単純化された安全評価をサポートするために、ナチュラルアナログに期待する分野を体系的に抽出し、それぞれの分野でナチュラルアナログが目指す目標（ゴール）を設定している。

セーフティケースの統合化に向けた研究では、段階的に進められる処分事業に着目し、事業成立性の観点からのセーフティケースに求められる要件を設定した上で、パッシブ・セーフティを基本とするシステムに移行するために必要な事項を考察した。

3.1 閉鎖前のセーフティケース

本節では、閉鎖前のセーフティケースに着目した研究成果を記述する。閉鎖前のセーフティケースは、処分場の閉鎖へ至るまでに人間が関与して構築するもので、原子力施設としての安全性と品質を確保しつつ事業の成立性の観点から、経済的で信頼性の高いシステムを構築していくことが目標となる。関連する分野として、以下の2テーマについて研究成果を取りまとめる。

- ・ 処分場操業時の安全性と品質確保
- ・ 人工バリアシステムの高度化

3.1.1 処分場操業時の安全性と品質確保

(1) 研究の背景

1999 年に公表された第 2 次取りまとめでは、ジェネリックなサイトを仮定し、HLW 処分の技術的な実現可能性と長期の安全性に着目した研究成果が記述されている。HLW 処分場の建設・操業を検討する上での前提条件として、堆積岩と結晶質岩を対象に、それぞれ地下 500m あるいは 1000m に地層処分場を建設し、そこに 4 万本のガラス固化体を 40 年の操業期間で埋設する（5 体／日平均）ことを前提とした。また、放射性核種の溶解・移行を遅延させるため、ガラス固化体、鋼製オーバーパック、ベントナイト緩衝材からなる人工バリアの概念が示されている（図 3.1-1）。放射性廃棄物が共存する地下深部の環境（高温・多湿、狭隘、放射線管理区域）において、このような人工バリアを、所定の品質を確保しつつ安全に構築していくには、遠隔操作を中心とした操業技術の準備が不可欠であるとされた。

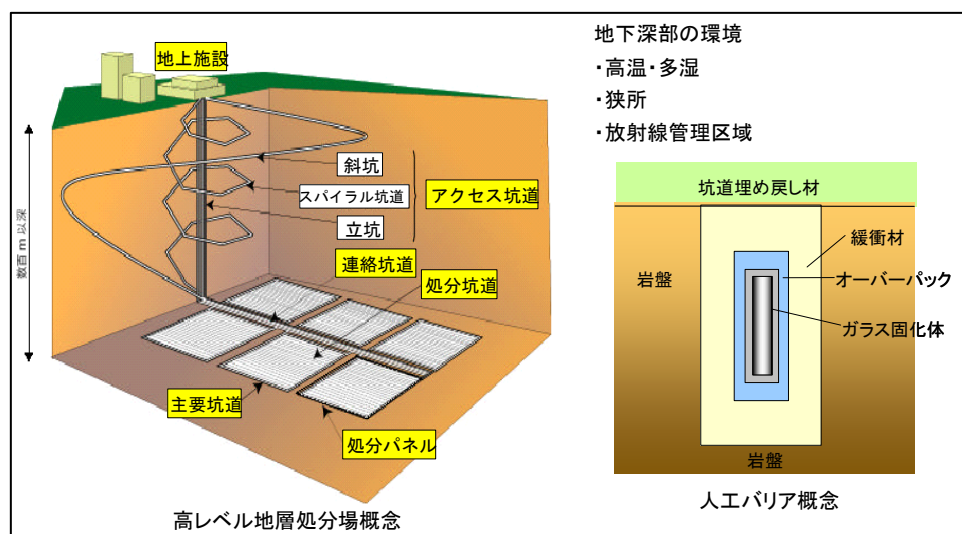


図 3.1-1 第 2 次取りまとめでの処分場概念と人工バリア概念（サイクル機構, 1999）

(2) 操業プロセスの概念と遠隔操作

HLW 地層処分場の操業概念は、図 3.1-2 に示すように大きく 4 つのプロセスに区分できる。

- ・ 地上施設でガラス固化体を鋼製オーバーパックに封入するプロセス
- ・ 放射線防護のための遮蔽が施された輸送設備を用いてオーバーパックを地下の所定の深度に立坑あるいは斜坑で搬送するプロセス
- ・ 地下施設内でのオーバーパックを搬送するプロセス（水平移動を仮定）

- ・ オーバーパックを所定の処分エリアに搬送し、ベントナイト緩衝材とともに定置するプロセス（EBS 定置）

これら一連のプロセスのうち、ガラス固化体を扱うエリアでは、固化体から生じる熱と放射線への対応を考慮し、放射線管理下の作業となる。どのプロセスを遠隔操作とするかについては、要求される放射線管理のレベル、地下施設の仕様と全体のレイアウト、地下の環境（温度、湿度、地下水流入量等）、搬送・定置するバリアの特性（重量、寸法）および要求される品質維持を考慮する必要がある。その範囲に対応して、遠隔操作による作業を念頭に置いた人工バリア、廃棄体の搬送・定置システム、プロセスを監視するシステム、定置前後の処分孔と処分坑道を検査するシステム、および異常を検知しその対応と回復をはかるシステム等、総合的な操業プロセスを構築することが求められる（河村他、2004）。

①地上での加工・製作

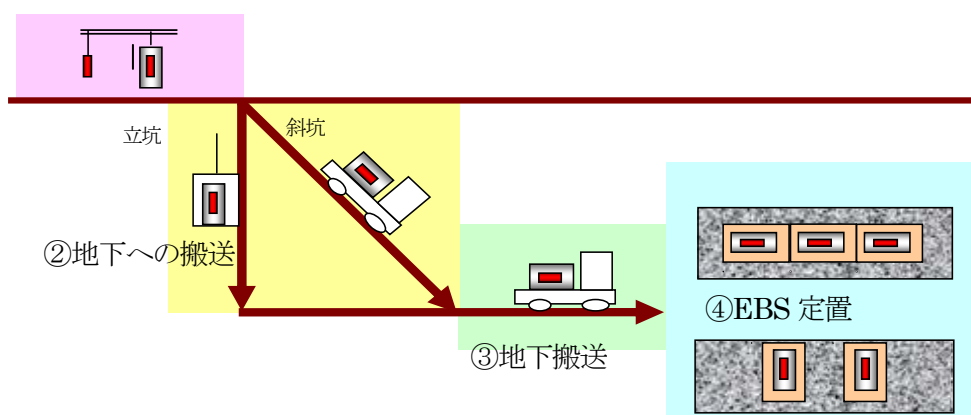


図 3.1-2 想定される操業プロセス（河村他、2004）

(3) 操業安全と品質確保への要件と原則

操業時の遠隔搬送と定置システムに求められる安全と品質確保への要件を設定するに当たり、これまでの一般産業界と原子力産業からの要求を考慮して、地層処分施設として特に考慮すべき事項を以下に設定した。

- ・ 地下での原子力施設である：鉱山法や安全衛生法など規定と原子力施設としての法規制との整合性の考慮、地下での移動する放射線管理区域の設定の考え方
- ・ 建設・操業・埋め戻し作業が輻輳される：地下での物流の複雑さ（潜在的な事故発生原因）、他のエリアへの影響伝播のルートの同定
- ・ 地表から地下作業エリアへのアクセスが限定される：事故・災害時の避難通路の確保、復旧

でのアクセス、救助までの隔離空間の確保

- ・ 繰り返し作業となる：4 万本 40 年間（5 本／作業日）、ヒューマンエラーの防止策
- ・ 安全操業が品質確保に密接に関連する：人工バリア設置時の事故、災害、異常事象の人工バリア初期品質への影響把握
- ・ 操業時の安全性を含むセーフティケースが閉鎖措置の要件となる：建設・操業時でのアクティブな対策が閉鎖後の安全性に与える影響の把握

以上の要件を包含する形で HLW 地層処分における操業時の安全と品質確保の 7 原則を以下に設定した（河村他、2004）。

原則 1：事前の把握

操業の検討（設計・計画）を始める前に、計画されている建設・操業・閉鎖作業の全体像を分析し、安全と品質に係わる事項・現象を把握しておくこと

原則 2：シンプルさの追求

地下での限定されたアクセス性と利用空間の大きさを考慮し、操業ラインの単純化を含め以下の観点からのシンプル化をはかること

- ・ 操業のステップ数の最小化
- ・ 操業に関連する機器の要素数の最小化
- ・ 機器の各要素の動く回数の最小化

原則 3：ロバスト性確保

想定外の事象に対して操業設備や機器が健全性を維持できるように、以下の事項を考慮した設計とすること

- ・ 検証、確証、吟味された材料、プロセス、機器の使用
- ・ 変動と異常事態に対する健全性維持（タフさ）の設計
- ・ 最も起こりそうな事象に対する fail-safe の設計
- ・ 破損の場合の容易な回復と取替え性、バックアップの確保

原則 4：ゾーニング

地下での輻輳作業を考慮し、適切な放射線管理区域の設定と解除にかかわる運営管理計画、およびそれに伴う換気・排水設備等の独立性を考慮した設計とすること

原則 5：劣化の排除

地下施設では、放射線影響、地下水に含まれる高濃度の塩分の影響、高温・多湿環境での微生

物活動等により、腐食や劣化が促進される。人工バリアを設置する環境については、以下の事項を考慮した環境整備を行うこと

- ・制約された区域での作業中の影響を最小化する設計
- ・管理下での機器の汚染を最小化する設計
- ・処分環境維持のために建設から作業までにいたるプロセス数の最小化

原則6：ヒューマンファクターの最小化

繰り返し作業に伴うヒューマンエラーを防ぐために以下の項目を準備しておくこと

- ・安全に係わる繰り返しプロセスの自動化
- ・人間が関与する作業の最少化
- ・作業員の注意力の維持を図る仕組み構築

原則7：安全と品質保証の統合化

安全性を損なう事象や災害は、作業員への影響と共に周辺環境や人工バリアの品質に直接影響を与えることから、以下の観点からの統合化に向けた対応をはかること。

- ・キーとなるプロセスのハードウェアの補完と独立した監視システムの導入
- ・作業のリバーシブル性（やり直し、逆戻り）の確保（非常事態への対応）
- ・実際に発生した事象と対応策の記録保存と再発生の防止措置（知識の継続性）

上記の原則は、これまで一般産業界等で議論がなされてきたものを、HLW 地層処分での作業プロセスの特徴を踏まえて、遠隔ハンドリング・定置システムの設計に対する基本原則として取りまとめたものである。これらの原則は、作業時の安全性と品質確保の状態を照査する指標としても用いることが可能である。特に原則7は、原子力施設となる処分場での安全確保と品質保証の統合化の重要性を強調した。また、HLW 処分では、長期の安全性を直接示すことができないことから、遠隔操作による定置を前提とした人工バリアの初期の性能を確保するための品質保証の原則と目標が重要となる。本論文では5章で初期施工品質に関連する研究成果を記述する。

(4) 安全・品質原則と遠隔作業プロセス

図 3.1.1-2 に示した4段階の遠隔作業プロセスに対する安全と品質確保上の要件について、上述した安全・品質確保の原則に照らし合わせて考察した。

①地上施設での作業プロセス

ガラス固化体からの放射線と熱の影響が最も大きい作業となることから、すべてのプロセスが

遠隔操作で実施される。水平および上下での作業ラインとなることから、その同線に着目したシステムの設計が求められる。7つの原則すべてについての照査が必要となる。

②地下施設への搬送プロセス

立坑あるいは斜坑を利用してオーバーパックと緩衝材は地下に搬送される。搬送設備としては、立坑ではエレベータ、斜坑では、タイヤまたはレール式の搬送車が用いられる。搬入中の遮蔽のレベルにもよるが、主要なシステムは遠隔での操作となることから、想定事象への事前の対応策、fail-safe 設備の準備などのシステム全体へのロバスト性が求められる。

③地下施設での搬送プロセス

オーバーパックの積み替え作業、長距離搬送、地下環境への対応、想定事象への対応、異常時の回復、リバーシブルなシステムの構築などが求められる。

④人工バリアの定置プロセス

処分エリアでの安全と品質確保は、人工バリアの定置概念に大きく依存する。これまで提案されてきた定置概念を図 3.1-3に示す。第2次取りまとめでは、高圧縮ベントナイトブロックを用いた処分孔縦置き方式（図 3.1-3上段左）と処分坑道横置き方式（図 3.1-3下段左）が標準定置形態として提示された。遠隔操作での定置方法もそれぞれの概念で異なるが、重量物であるオーバーパックのハンドリングのシンプルさ確保、定置中異常時のリバーシブル性確保、緩衝材設置での地下水流入への対応、および孔壁安定のための支保工の存在が品質確保上の留意点となる。

	Bentonite Block	CIP	In-situ Compaction	Pellet	Pre Fabricate Module
Bentonite Vertical					
Bentonite Horizontal					

図 3.1-3 人工バリア定置概念（河村他、2004）

(5) 操業時の安全確保への要件の階層構造化

今後計画される建設・操業・閉鎖関連の技術の評価のために、前述の安全原則と目標をベース

に要件の階層構造化を試みた。表 3.1.1-1 に整理した要件は、人工バリアシステムの定置までの作業に着目し、レベル1として大原則（人工バリア定置時の安全性確保）を、レベル2で、7つの安全原則、レベル3以下でその詳細化を図っている。レベル4では、それぞれの部位による代表的な要件を提示した。これらは、いずれも要件であり、これらの要件に対し、準備される技術がどの程度満足しているかを評価し、品質要求との関連も考慮しつつ最適化を図っていくことになる。

HLW 処分の作業時の安全評価では、上記の要件に対する関連設備やシステムの性能を評価することになるが、同時に故障・事故発生による影響についても予測しておく必要がある。本研究では、作業時の事故・異常事象が品質に与える影響を5段階のレベルにわけ、それぞれについての対応策のレベルを準備することを提案した（河村他、2008）。原子力施設の特徴の一つに、放射線管理区域での作業がある。事故や異常が発生した場合の救出、回収、修復などの作業がいずれも管理下で実施しなければならず、そのための設備の準備が不可欠となる。

図 3.1-4に作業時の安全性を検討するフローを提示した。本検討フローでは、事故による影響を削減するための対策として、以下の2つの方策を提案する。

A：発生可能性を削減する／影響を削減する方策

B：発生時の避難・救助／影響の沈静化／影響拡大防止／修復・回収・回復方策

発生の可能性を削減する／影響を削減する方策は、事前の策として設計等で準備しておく事項で、前述した安全・品質確保の原則がその指標として適用することができる。発生時の避難、影響の沈静化、拡大防止などの方策は、事項や災害が発生することを前提に準備し、及ぼす影響の程度と安全確保にかかる費用との対比での最適化を図るフローとした。実プロジェクトで検討フローに従い処分場の設計をしていく場合、以下の視点からの最適化が求められる。なおこれらの視点についての詳細な研究成果は 3.3 節のセーフティケースの統合化、4.3 節の多属性効用解析でも取り扱う。

- ・ 技術的実現性
- ・ 作業安全性（放射線リスクのレベル）
- ・ 長期安全性（品質への影響）
- ・ 環境影響
- ・ 経済性

環境影響では、周辺住民への直接的な影響のみならず、事業としての社会的な影響も考慮しておく必要がある。また、事故による制裁として事業が中断することでの処分スケジュールの遅れ、

コストの増加などの影響についても最適化に向けての判断指標となる。

このように、閉鎖前のセーフティケースを構成する指標は、相互に関連したものであり、また相反する性格を有する指標も存在する。

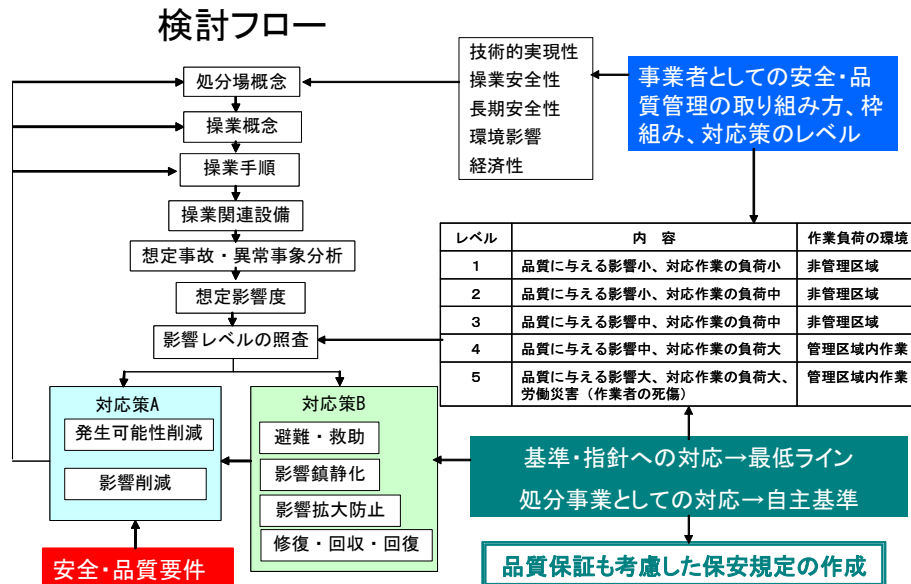


図 3.1-4 作業時の安全評価と対応策設定までの流れ（河村他、2008）

(6) まとめと今後の展開

作業時の安全性と品質確保は、閉鎖前のセーフティケースの根幹となる。本節で提案した安全と品質の7原則は、EBS 処分概念の相互比較の指標として用いることができるとともに、安全と品質確保のための要件にも展開できることを示した。さらにこれらの要件を用いて、作業時の安全評価と対応策設定までの流れを構築した。

今後は、これらの研究成果を実際プロジェクトに適用することで、閉鎖前のセーフティケースを確実に構築し、閉鎖後のパッシブなシステムに移行するための評価技術や具体的な対応策の検討に展開していく。

表 3.1-1 人工バリアシステム構築における安全要件の階層構造

レベル1	レベル2	レベル3	レベル4	要件に対する解説
EBS が安全に構築できること	2.1 事前の方策がとられていること	2.1.1 作業時の異常・事故が容易に予測できること	2.1.1.1 地表での製作・加工時の異常・事故予測が容易にできること	異なる空間での作業時の異常、事故が予測できるシステム・プロセスに設計されている。作業空間の安定性、作業環境の安全レベルの維持、作業に伴う事故事象、作業装置の異常などが事前に予測できるレベルに設計されている
			2.1.1.2 地下への搬送・積み替え作業時の異常・事故が予測できていること	
			2.1.1.3 地下での搬送・積み替え作業時の異常・事故が予測できていること	
			2.1.1.4 定置作業時の異常・事故の予測ができていること	
			2.1.1.5 処分坑道・処分孔閉鎖時の異常・事故の予測ができていること	
		2.1.2 作業時の異常・事故への対応が容易にできること	2.1.2.1 地表での製作・加工時の異常・事故への対策が容易にできること	自然災害を含めて、異常時、事故時への対策、避難ルート の確保、復旧の準備ができている
			2.1.2.2 地下への搬送・積み替え時の異常・事故への対策が容易にできること	
			2.1.2.3 地下での搬送・積み替え時の異常・事故への対策が容易にできること	
			2.1.2.4 定置作業時の異常・事故への対策が容易にできること	
			2.1.2.5 処分坑道・処分孔閉鎖時の異常・事故への対策が容易にできること	
	2.2 単純化が図られていること	2.2.1 物流動線がシンプルであること	2.2.1.1 地表で製作・加工の物流ラインがシンプルであること	地表から地下定置までの物流ラインで、並列・直列ライン の複合、ラインの合流・分岐、輻輳ライン作業が最小化さ れている
			2.2.1.2 地下への搬送・積み替えラインがシンプルであること	
			2.2.1.3 地下での搬送・積み替えラインがシンプルであること	
			2.2.1.4 定置の物流ラインがシンプルであること	
			2.2.1.5 処分坑道・処分孔の閉鎖物流ラインがシンプルであること	
		2.2.2 操業関連装置構造がシンプルであること	2.2.2.1 地表での製作・加工装置の構造がシンプルであること	製作・加工、搬送、定置、閉鎖に関連する装置の構造が故 障、異常時に対応しシンプルに設計されている
			2.2.2.2 地下への搬送・積み込み装置の構造がシンプルであること	
			2.2.2.3 地下での搬送・積み替え装置の構造がシンプルであること	
			2.2.2.4 定置装置の構造がシンプルであること	
			2.2.2.5 処分坑道・処分孔閉鎖装置の構造がシンプルであること	
	2.3 ロバスト性が確保されていること	2.3.1 関連装置が異常に対して頑健に設計されていること	2.3.1.1 地表での製作・加工装置が異常に対して頑健に設計されていること	各装置が冗長性を有し、fail-safe の思想で設計されている
			2.3.1.2 地下への搬送・積み込み装置が異常に対し頑健に設計されていること	
			2.3.1.3 地下での搬送・積み替え装置が異常に対し頑健に設計されていること	
			2.3.1.4 定置装置が異常に対して頑健に設計されていること	
			2.3.1.5 処分坑道・処分孔の閉鎖装置が異常に対し頑健に設計されていること	
		2.3.2 異常・事故が連鎖を引き起こさないように設計されていること	2.3.2.1 製作・加工時の異常・事故が連鎖しないように設計されていること	各作業の独立性を有し、異常・事故などが連鎖して発生し ないシステム（構造）が準備されていること
			2.3.2.2 地下への搬送・積み込み時の異常が連鎖しないこと	
			2.3.2.3 地下での搬送・積み替え時の異常に対し連鎖しないこと	
			2.3.2.4 定置時の異常が連鎖しないこと	
			2.3.2.5 処分坑道・処分孔の閉鎖時の異常が連鎖しないこと	
2.4 作業空間が区別されていること （ゾーニング）	2.4.1 管理区域が設定され区分されていること	2.4.1.1 輻輳作業での管理区域が確実に設置されていること	輻輳作業の分離、管理区域内作業環境では、遮蔽等の安全 防護策が準備されている	
		2.4.1.2 管理区域内での放射線防護策が準備されていること		
		2.4.1.3 排水、換気、エネルギー供給ラインの分離がなされていること		
	2.4.2 管理区域の移動に伴う切替えが確実にできること	2.4.2.1 管理区域の移動に伴う作業君間の切り替えが確実にできること	段階的な作業の展開に伴う管理区域のスムーズな移管が 設計されている	
		2.4.2.2 管理区域の移動に伴う物流ラインの切り替えが確実にできること		
	2.4.3 非管理区域と管理区域の物流が安全にできること	2.4.3.1 非管理区域と管理区域との物流が安全にできること	異常時、事故時への迅速な対応のための、各区域間の物流、 避難、救助作業等への対応がなされている、	
2.4.3.2 管理区域への立ち入りが容易にできること				
2.5 環境への配慮がなされていること	2.5.1 排ガス、排熱、騒音、振動、廃棄物発生が少ないこと	2.5.1.1 処分区画での排ガス、排熱、騒音、振動、廃棄物発生が少ないこと	地表と作業環境への防護のために、地下からの排吐物への 対応ができている	
		2.5.1.2 地表への排吐物の対応が確実になされていること		
	2.5.2 放射線による環境影響が最小限に抑えられていること	2.5.2.1 作業環境での放射線による環境影響が最小限に抑えられていること	通常作業での放射線による影響を最小限とする方策がな されている	
		2.5.2.2 地表への放射線による環境影響が最小限に抑えられていること		
	2.5.3 作業空間の劣化が最小限に抑えられていること	2.5.3.1 作業空間の劣化が最小限に抑えられていること	定置までの処分坑道、処分孔が安全に維持されている	
		2.5.3.2 管理下での人間作業の最小化が図られていること		
2.6 人間の関与が最小限に抑えられて いること	2.6.1 管理下での人間作業の最小化が図られていること	遠隔操作による定置作業が図られている		
	2.6.2 ヒューマン・エラーの最小化が図られていること		作業工程に人間の関与を最小限とする設計がされている	
	2.6.3 復旧作業での人間関与の最小化が図られていること			
2.7 安全管理と品質管理の統合化が はかれていること	2.7.1 作業は全てモニターできる準備がなされていること	2.7.1.1 作業は全て容易にモニタリングできること		
	2.7.2 モニタリング記録が確実に保存されていること	2.7.2.1 モニタリング記録が確実に保存されていること		
	2.7.3 品質に係わる異常は確実に伝達されること	2.7.3.1 品質に係わる異常は確実に伝達されること		
	2.7.3 品質に係わる異常は確実に伝達されること	2.7.3.1 品質に係わる異常は確実に伝達されること		

【参考文献】

- 1) 核燃料サイクル開発機構(1999): わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 分冊 2、JNC TN1400 99-022
- 2) Ian G. McKinley, Kenichi Kaku, Fiona Neall, Hideki Kawamura, Eiichi Asano (2005): Assessment of operational-phase safety of deep geological repositories for radioactive waste, PSAM2005
- 3) 河村秀紀、朝野英一、長谷川宏、増田良一(2006): 高レベル放射性廃棄物処分操業時における安全・品質確保の考え方、pp.156-157、日本機会学会、第9回動力・エネルギーシンポジウム
- 4) 河村秀紀、Ian G. McKinley (2008): 閉鎖前のセーフティケースに関する考察、M50 pp.746、日本原子力学会 2008 年秋の大会
- 5) Hideki Kawamura, Ian G. McKinley, Satohito Toguri, Hidekazu Asano(2008): Quantifying the performance of various EBS emplacement methods, pp.436-469, IHLRWM 2008, Las Vegas, NV, Sep 8-12

3.1.2 人工バリアシステムの高度化

本研究は、第2次取りまとめで提示された人工バリアシステムを対象に、人工バリアの高度化が閉鎖前の安全性と品質保証を確実にし、その結果として閉鎖後のセーフティケース構築に寄与することを示す目的で実施した。(McKinley et al., 2006)

(1) 研究の背景

第2次取りまとめにおける人工バリアシステム概念は、基本的に 1980 年代に構築されたスイス Nagra の処分坑道横置き概念、スウェーデン SKB の処分孔縦置き概念を踏襲している。特にガラス固化体を対象に地下水による核種移行を基本シナリオとするスイスの概念を参照し、鋼製オーバーパックとベントナイト緩衝材の組み合わせを基本概念として採用した。前述したように、第2次取りまとめでは、HLW の地層処分の実現性を現状の技術レベルで明示することを一義的な目標とし、安全評価において1体のガラス固化体を評価することで得られた結果を4万倍し、全数の影響に結びつけることができるという考え方を導入している。

処分の実現に向けての段階が進むにつれ、ジェネリックな地質環境を対象とした処分の実現性の明示から、多様な地質環境特性に対応したより現実的で合理的な処分概念（特に人工バリアシステム概念）の構築と共に、建設・操業時の安全性と確実な品質確保に向けての研究が必要となってきた。

本節で扱う人工バリアシステムの高度化研究は、このような要請を考慮し、高度化による閉鎖前のセーフティケースの信頼性を高めるために実施した成果である。

(2) 高度化に向けて考慮すべき事項

第2次取りまとめに示された標準的な人工バリアシステムは、処分孔や処分坑道に高圧縮ベントナイトブロックとオーバーパックを遠隔操作で定置することを基本としている。例えば処分孔縦置き定置では、SKB と POSIVA が共同研究 (KBS-3V) として、スウェーデン Äspö 岩盤試験場において、手動による装置を用いた実規模の人工バリアと廃棄体の定置試験を実施した。その作業中、処分孔に浸入した地下水の影響で、ベントナイトブロックは容易に崩壊してしまった (Böegesson et al., 2002) という結果が報告されている。また、処分坑道横置き概念での実規模試験は、スペインがスイス Grimsel 岩盤研究所を用いて実施した試験 (FEBEX) がある。そこではベントナイトブロックを定置中に、処分坑道に侵入してきた地下水の影響でブロックの壁が崩壊した例が報告されている (Huertas et al., 2000)。

ベントナイト緩衝材は、長期の安全性を確保する上で最も重要なバリアであり、高度な初期品質が要求される。わが国での現実的な地下環境を想定した場合、地下水の流入量はスイスやスウェーデンより多いと推定され、また、対象とする岩盤も均質でなく、埋設する環境は一定でない条件となる可能性がある。さらに、スイス、スウェーデンでの HLW 処分スケジュールは、オーバーパック 1 本／日であり、5 本／日のわが国からすると作業時の何らかのトラブルは処分全体のスケジュールに大きな影響を及ぼす可能性がある。

横置き、縦置き概念ともベントナイトブロックは、処分坑道に直接、遠隔操作による定置が検討されている（朝野他、2008）。前述した処分坑道への地下水流入への対応、ユニットとしてのブロックの遠隔での搬送と取り扱い、接触等で容易に破損する材料特性を考慮すると地下の狭隘で高湿潤な環境でのベントナイトブロックの定置は、技術的に乗り越えなければならない課題が大きいと判断される（McKinley et al., 2006）。

(3) PEM概念

前述の背景や求められる性能を考慮し、人工バリアシステムの高度化として考案した概念を、Prefabricated EBS Module (PEM) と呼ぶ。この概念は、わが国で遭遇する地下環境と人工バリアの初期性能の重要性、および前述の安全と品質確保の原則を考慮して考案した概念である。PEMの基本構造を図 3.1-5に示す。

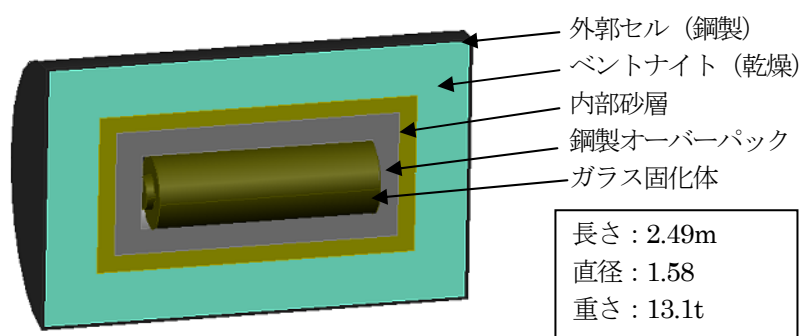


図 3.1-5 PEM の概要（McKinley et al., 2004）

PEMの基本概念は、地表施設でベントナイトとオーバーパックを鋼製セル内に格納し、鋼製セルを運搬・定置することで、搬送・定置中の外部の影響を遮断する構造を採用している。特に処分孔や処分坑道での地下水の浸入に対して、確実に防護できるとともに、地表作業による品質管理や安全性確保の容易さ、偶発的な事象に対するロバスト性、また搬送・定置作業のシンプルさ

という安全原則を満足することができる。図 3.1-5に示されたベントナイト内側の砂層は、オーバーパックの腐食による水素ガスの蓄圧の防止、腐食生成物のベントナイトへの影響緩和を期待して設計されている。PEMと同様な概念は、形態は異なるがスウェーデン、ベルギーでスーパー・コンテナの名称で製作され、地下研究施設での定置実証試験が展開されている（スウェーデン：KBS-3Hプロジェクト：Pettersson et al., 2008, ベルギー：Humbfeck et al., 2008）。

(4) PEM概念の高度化

さらに高度化に向け、単一のガラス固化体を格納するPEMの概念を図 3.1-6に示すように6本のガラス固化体を格納する概念に展開した。

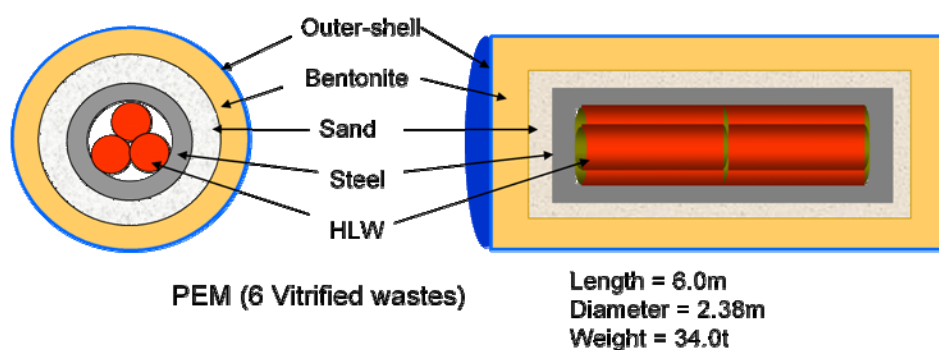


図 3.1-6 6本のガラス固化体を格納する PEM 概念(Kawamura et al., 2008)

この概念は以下に示す特徴を有する。

- ・ 人工バリアシステムとしての基本構成要素は、単体の PEM の場合と同様である。
- ・ 外郭の鋼製セル容器は、操業中および数十年にわたり外部からの影響を遮断する性能を有する。
- ・ PEM はレールを用いて搬送され、直径 3.5m の処分坑道（長さ 100～200m 程度）に横置きに定置される。処分坑道の径が大きいのは、搬送定置時のジャミング防止と定置後の間隙への充填を容易にするためである。
- ・ 6本のガラス固化体を一度に定置することで、1ユニットPEM／日のスケジュールとなり、定置作業の単純化を含め裕度を持ったスケジュールとなる。

大型PEMを用いることで、遠隔での搬送・定置作業の大幅な削減をはかることができ、また地表での製造による高度な品質が確保される。図 3.1-7に搬送から定置およびPEM周辺の充填作業

のイメージ図を示す。レール搬送を使用することで、作業時の異常事象に対してのロバスト性を高めることもできる。

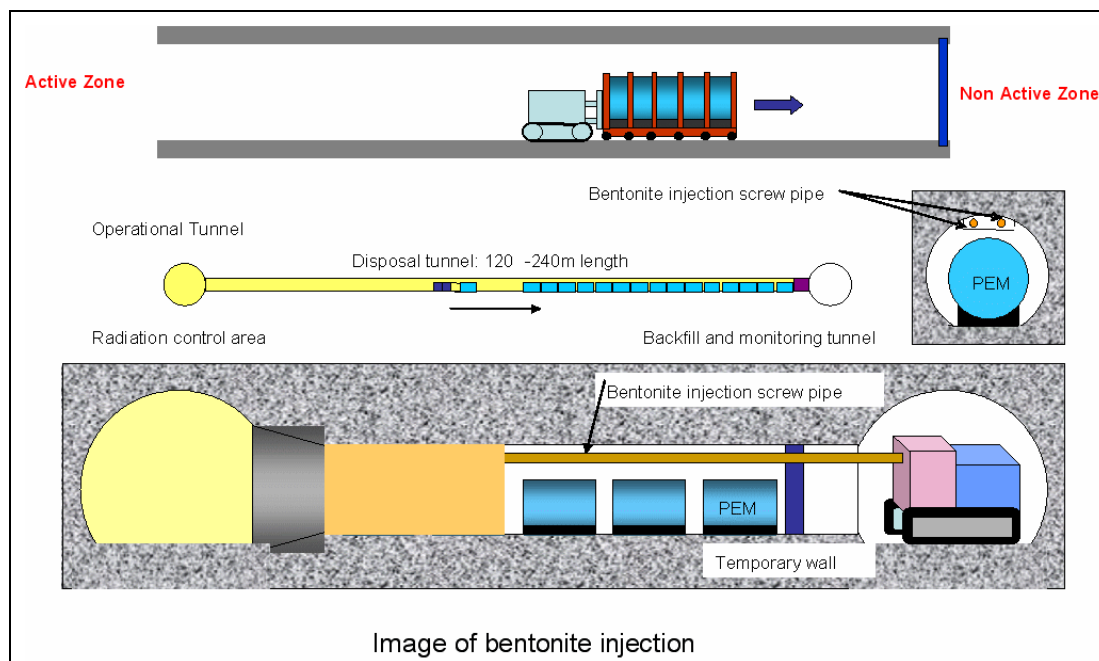
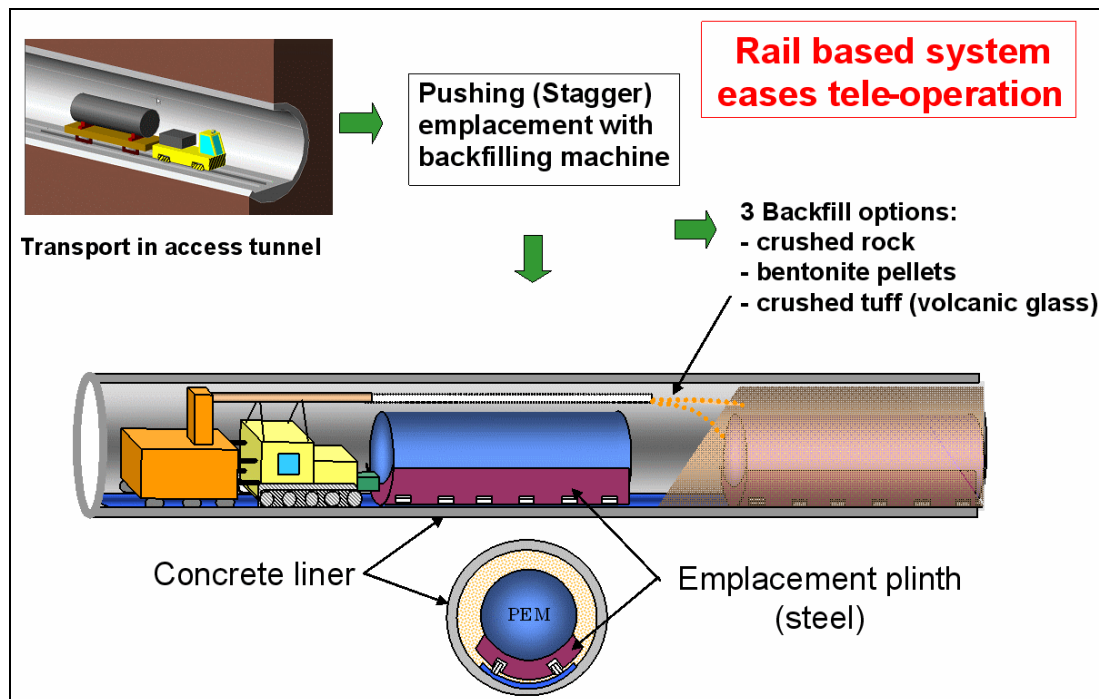


図 3.1-7 大型 PEM の搬送・定置および空隙充填のイメージ (Kawamura et al., 2008)

(5) 間隙の充填

大型 PEM の作業性のために、処分坑道は 3.5m の径を想定した。そのため、PEM 定置後は比較的量の多い充填材が必要となる。充填材を選択する場合の重要な指標は、ベントナイトへの影響であり、基本的には周辺岩盤と同じ材質の材料で充填することが望ましい。図 3.1.2-3 に示したようにスクリュウ・コンベアを用いてベントナイト・ペレットを充填する方法もある（Nagra EN2002 概念、2002）。堆積岩の場合は、ガラス質を大量に含む粒度調整をした凝灰岩での充填もベントナイトとの調和性を考慮した場合に有力な材料となる（McKinley et al., 2004）。PEM は外郭セルで防護されていることもあり、処分坑道に定置後、時間を置いて充填することが可能であり、熱の問題や回収可能性の要件にも柔軟に対応できる。

(6) 処分場規模への影響

大型 PEM で考慮しておかねばならない課題は、6 本のガラス固化体から発生する熱の問題である。従来の処分場のレイアウト設計では、ガラス固化体から発生する熱量とベントナイトの温度制限（100℃）と処分坑道の安定性から埋設密度が決定され、処分全場全体の規模が設定されてきた。同じ設計思想で大型 PEM での処分場レイアウトを決定する場合、熱影響は線形となるため、単純に 100℃ の制限を考慮すれば、オーバーパック 1 本の PEM での規模と同じ広さの処分場が必要とされる。ガラス固化体 1 本格納の PEM での離隔距離を標準として、PEM の定置間隔を固定し、ベントナイトの温度上昇を解析的に求めた結果を図 3.1-8 に示す

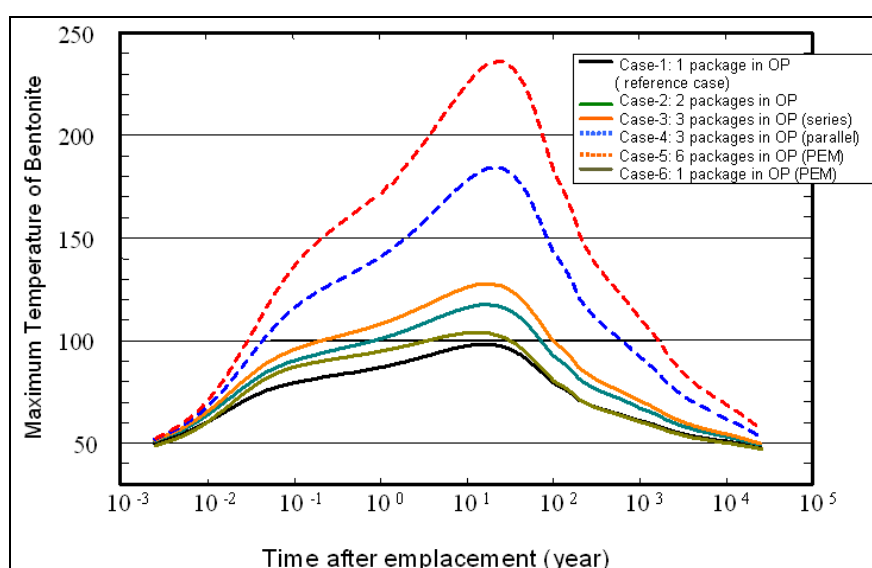


図 3.1-8 PEM 内ベントナイト温度の変遷（Kawamura et al., 2006）

図中case-1 はオーバーパック（OP）内にガラス固化体を 1 本定置した第 2 次取りまとめでの標準ケースを示している。Case-2 ではガラス固化体 2 本が直列に、case-3 ではガラス固化体が 3 本直列に、case-4 ではガラス固化体 3 本が並列にオーバーパックに格納されたケースである。case-5 で示した 6 本のガラス固化体を格納した大型 PEM において、埋戻し後 20 年程度でベントナイト温度は 240℃に達する。ベントナイトの熱変質を考慮した実験結果（Push, 1983）によりこれまでの多くの設計では、温度の上限値として 100℃を採用していたが、最近の研究では、乾燥したベントナイトでの熱的な影響について、300℃以下であれば変質は発生しない試験結果が報告されている（Wersin et al., 2007）。PEMは地表で作成されることから十分な品質管理の下で乾燥状態が担保できること、また外郭セルにより外部環境から数 10 年隔離することが可能であり、空隙の充填を遅らせることで、熱的な影響は排除できる可能性が高い。このような最近の研究事例を参照して、処分場の必要面積を求めた結果を図 3.1-9に示す。

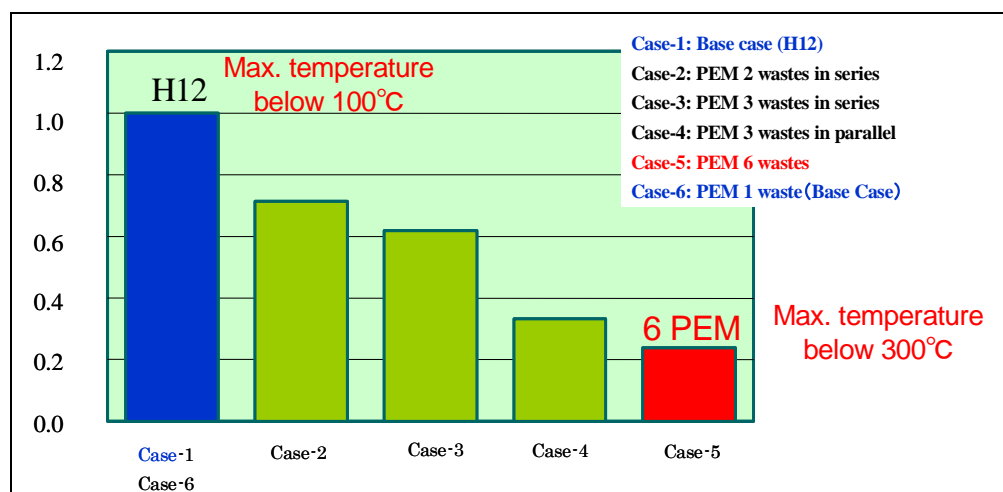


図 3.1-9 処分場の規模の比較（Kawamura et al., 2006）

標準ケースとして第 2 次取りまとめでの埋設密度(H12)に必要な面積を 1.0 とすると、図中 Case-5 で示した大型 PEM（case-5）が必要とする処分場の大きさは約 0.2 になる。処分場の必要面積の値は、建設・操業・埋戻し全ての数量にも影響すること、また大型 PEM を用いることで操業プロセスを大幅に削減することができ、結果として大型 PEM の採用は、閉鎖前のセーフティケースをロバストとすると共に経済効果も大きいことが期待される。

(7) まとめと今後の展開

閉鎖前のセーフティケースに反映するために、PEM による人工バリアシステムの高度化を図ってきた。PEM の概念は、処分事業における安全性と品質確保をより確実にすると共に、経済的な観点からも有利となる。一方、遠隔操作による搬送・定置の観点からは、重量と大きさが増すが、搬送・定置作業回数が簡略化されることにより、前節で提示した安全と品質確保の階層構造的な要件による評価でも高い優位性を示すことが示唆される。

残された課題は、これらの高度化した PEM の製作技術および定置までのハンドリング技術の開発である。また、空隙を充填する技術の開発なども必要となる。さらに長期の安全性の観点からは、複数のガラス固化体が格納されたモデルの開発が必要となる。

【参考文献】

- 1) Börjesson L., Gunnarsson D., Johannesson L.-E., Sandén T., Äspö Hard Rock Laboratory (2002): Prototype Repository: Installation of buffers, canisters, backfill and instruments in Section 1. International Progress Report IPR-02-23. SKB, Stockholm, Sweden
- 2) Huertas F., Fuentes-Cantillana J.L., Jullien F., Rivas P., Linares J., Fariña P., Ghoreychi M., Jockwer N., Kickmaier W., Martínez M.A., Samper J., Alonso E., Elorza F.J.(2000): Full-scale engineered barriers experiment for a deep geological repository for high-level radioactive waste in crystalline host rock (FEBEX project): Final report. EUR 19147 EN. European Commission, Brussels
- 3) Autio J.(2005): KBS-3H design description 2005. Posiva Working Report 2007-11 and SKB Report R-08-29. Posiva Oy, Olkiluoto, Finland and Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden
- 4) Kawamura. H., McKinley. I. G, Neall. F.B (2006): Challenges for tele-handled emplacement of the EBS for Japanese HLW, Proc. International High-Level Radioactive Waste management Conference, Las Vegas, USA
- 5) McKinley, I.G. (1997): Engineering for robustness: an approach to optimising HLW disposal concepts, Waste Management 17, 1-8
- 6) McKinley, I.G., Kawamura, H., Tsuchi (2001): H., Moving HLW-EBS concepts into the 21st Century, Science Basis Nuclear Waste Managing, XXIV, 723-729 .
- 7) Nagra (2002): Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers. Nagra technical report NTB 02-02, Nagra, Wettingen, Switzerland
- 8) Nagra (2002): Project Opalinus Clay: Safety Report. Nagra NTB 02-05, Nagra, Wettingen, Switzerland
- 9) Wersin, P., Johnson, L.H., McKinley, I.G.(2007): Performance of the bentonite barrier at temperatures beyond 100 °C: A critical review, Physics and Chemistry of the Earth, 32, 780-788.
- 10) Stig Petersson, Eric Thurner, Bo Halvarsson (2008): Operational Safety for a KBS-3H repository, ESDRED
- 11) Hughe Van Humbfeck, Wim Bastiaens, Chris De Bock, Alain Van Cothems (2008):

Experimental programme to Demonstrate the viability of the Belgian Supercontainer concept for HLW, ESDRED

- 12) Satohito Toguri, Hidekazu Asano, Hojime Takao, Takeshi Matsuda, Kiyoshi Amemiya (2008): Full scale Demonstration of EBS Construction technology (1) Block, Pellet and In-Situ Compaction method, ESDRED
- 13) Hidekazu Asano, Satohito Toguri, Yumiko Iwata, Susume, Kawakami, Yuji Nagasawa , Takeshi Yoshida (2008): Full scale Demonstration of EBS Construction technology (2) Design, Manufacturing and Transportation of Pre-fabricated EBS Module (PEM), ESDRED
- 14) Hideki Kawamura, Ian G. McKinley, Fiona B. Neall (2008), Practical and Safe Implementation of Disposal With Prefabricated EBS Module, ESDRED
- 15) Hideki Kawamura, Ian G. McKinley (2008), Integrated Safety Case Development for Deep Geological Disposal, ESDRED

3.2 閉鎖後セーフティケース：セーフティケースからナチュラルアナログへの期待

(1) 研究の背景

閉鎖後のセーフティケースとして中核をなすのは放射性核種の移行に着目した安全評価である。安全評価では、パッシブな多重バリアシステムによる安全確保を基本とし、多重バリアの時系列的な変遷を核種移行の場として、物質移動モデルにより定量的に評価するアプローチを採用している。

安全評価で用いるモデルは、理論的な考察と実験や観察での知見を中心に組み立てられるが、時系列的な場の変遷と核種移行プロセスは相互に関連しており、モデルを構築してもその妥当性を実証することは困難であると指摘されている（IAEA, 2000, OECD/NEA, 1998）。長期の安全評価では、シナリオ設定、モデル構築、パラメータ設定において、多くの不確実性が存在することは前節でも言及してきた。これまでの評価では、不確実性への対応として保守的な仮定と専門的な判断を導入してきたが、全ての要素に追跡性と説明性を維持し、定量的に示すことには限界があることも広く認識されている（IAEA, 2006）。セーフティケースの概念が必要とされた背景がこの点にある。

安全評価で扱う、前提や事象・プロセス、またはモデルやパラメータに関して、自然界に類似の現象を求めるナチュラルアナログ研究は、1980年代の初頭から McKinley, Chapman らによって開始された（McKinley 1987, Chapman 1989）。初期のナチュラルアナログ研究は、安全評価に直接関連する類似現象を自然界から学ぼうと、類似現象を見つける研究から開始された。例えば、オクロの天然原子炉、シガーレークのウラン鉱床などが挙げられる。また、ローマ時代の古い釘の腐食の状態、ウランを含むガラス器など考古学的アプローチもナチュラルアナログの研究対象として選ばれてきた。

1990年代に入り、ナチュラルアナログは安全評価で扱うモデルやパラメータの確証の一部としての取り組みが活発となった。ヨルダンでの天然セメントがもたらす高アルカリ雰囲気での天然ウランの溶解度に関する研究等である（Alexander, 1995）。そこでは処分の安全評価で扱う重要なプロセスに関連する自然界のエビデンスを用いて、実際の処分場で想定されるプロセスモデルの妥当性を証明することが実施された（Alexander, 1997）。

2000年代に入り、セーフティケースの概念が導入され、ナチュラルアナログは、安全評価の傍証だけでなく、様々な視点からのエビデンスとその解釈を用いて、処分の安全確保方策の目指す主要なプロセスや現象を分かりやすく説明することができる手法として、その役割の重要性が再

認識されてきている (Alexander et al., 2002)。また、ナチュラルアナログでは、異なる分野の専門家が学術的な議論を集約する必要があることから、セーフティケースに必要とされる Multiple lines of Evidence のアプローチ (Chapman, 2005) を必然的に満足することができる。

本節では、以上の認識のもとに、地層処分の閉鎖後のセーフティケースとして、ナチュラルアナログに期待する分野について研究した成果を記述する。

(2) セーフティケースとナチュラルアナログ

本研究では、核燃料サイクル機構のH17 報告書で記述されたセーフティケースの階層構造のテンプレート (図 3.2-1) を対象に、ナチュラルアナログに期待される分野をトップダウン的に設定する作業から開始した。この階層構造は、ある特定サイトでの条件のもとで「対象となるシステムは安全である」というメッセージをセーフティケースとして伝えることを目的に構築されたものである。構成要素として、「サイト・スペシフィック」と「サイト・ジェネリック」な項目があり、その中で、本研究で対象とするHLWの第2次取りまとめ、TRUの1次レポートに示された標準的なHLW/TRU処分場の概念と立地の可能性のある環境を考慮した結果、わが国特有の課題として、以下の分野を抽出できた (河村他、2007)。

- ・ 母岩を中心とした地質・地質構造の長期安定性
- ・ 母岩を中心とした深部地下水の長期安定性
- ・ 人工バリアシステムの核種保持性
- ・ 天然バリアの核種保持性
- ・ 工学的な影響に対する自然界の回復性
- ・ 地表近傍の変動に対するロバスト性
- ・ 人工バリア材料の長期健全性

これらの分野を対象に、閉鎖後のセーフティケースとしてのメッセージを作成し、それらのメッセージにナチュラルアナログ的なアプローチの可能性を考察した。

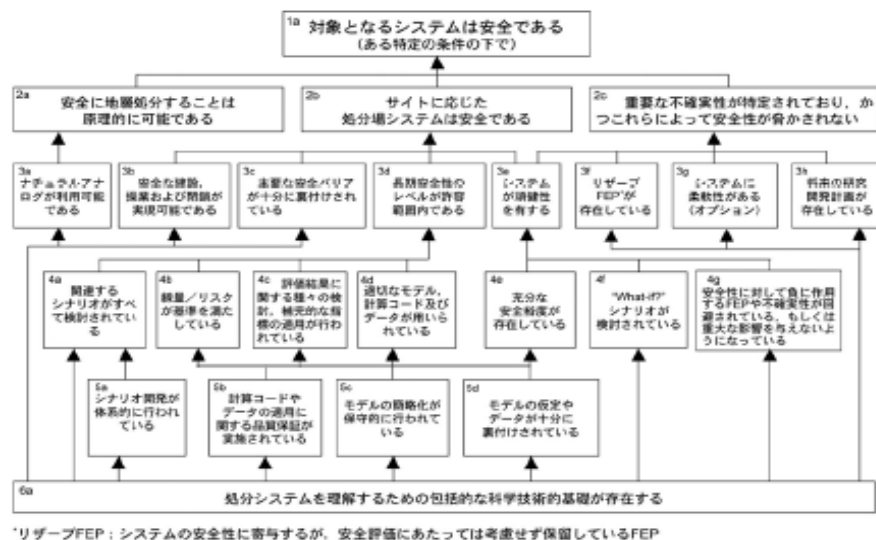


図 3.2-1 セーフティケースの階層構造のテンプレート (サイクル機構, 2005)

(3) わが国で想定される立地環境と処分概念

わが国での立地が想定される環境は、大きく、内陸、沿岸、島嶼などの地形と堆積岩系、結晶質岩系の岩種との組み合わせが考えられている（原環機構、2002）。想定される組み合わせを考慮して作成した模式図を、処分場の位置とともに図 3.2-2に示す。HLW処分では、処分候補地の段階的な選定プロセスが規定されており、現在は、公募による文献調査地区の選定が進められている。初期段階であるため、処分の立地環境は幅広く考慮されており、処分概念もジェネリックな環境を想定して構築されている。ナチュラルアナログに期待されているサイト・スペシフィックな分野での研究も、立地環境が定まらなると具体的に類似現象をとらえることは困難であるが、わが国では母岩を含む地質構造の安定性、深部地下水の安定性は、どのようなサイトが選定されても安全確保の大前提となる。さらに、地下水移行シナリオを基本とする多重バリアシステムでの放射性核種の閉じ込め性能、および長期での変動に対する性能の健全性と変化の予測の確からしさを示す指標に関する研究は、サイト・ジェネリックな事項としても取り扱うことは可能である。

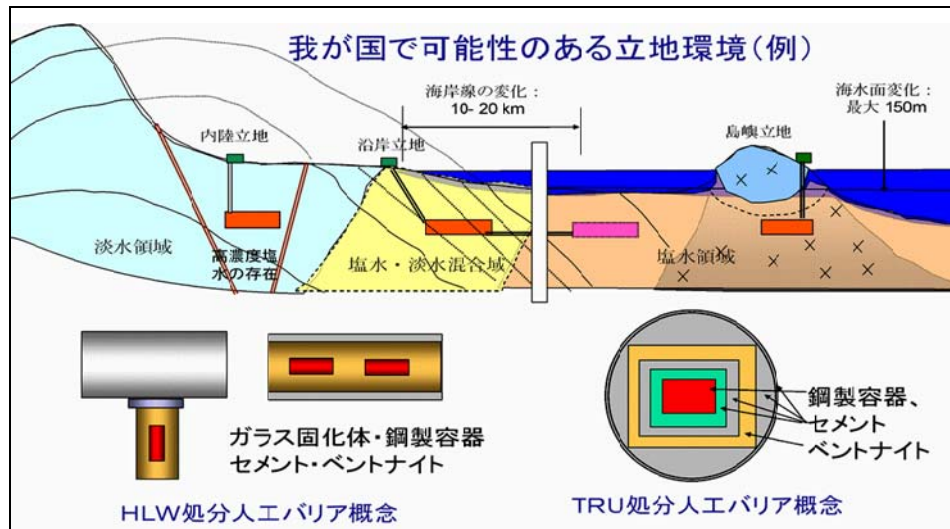


図 3.2-2 わが国で想定される多様な立地環境（河村他、2006）

図 3.2-2に示した立地環境例では、処分場の位置により考慮すべき事項は異なるが、基本的には、処分場からの核種の移行に対する多重バリアの核種保持性能、気候変動の影響を大きく受ける地表近傍の環境の変化が、安全性に大きな影響を及ぼすと想定できる。また、処分場周辺母岩の長期の安定性とその周辺の地下水環境の安定性も直接的に安全性に影響を及ぼす。

図 3.2-2を前提に、ナチュラルアナログに期待されるゴールについて、概要調査段階までの作業を考慮して考察する。

(4) ナチュラルアナログに期待されるゴール

① 母岩を含む地質・地質構造の安定性

地層処分の長期安全性の基本は、安定した地質環境への廃棄物の埋設である。ここでは、地質環境の中で、処分の評価の対象となる深さと広さを有した特定の母岩領域の長期安定性に着目して、ナチュラルアナログへの要件を考察する。図 3.2-3に、セーフティケースとしてのメッセージ「概要調査地区で選定された地点は、地質構造が安定しており、いかなる除外要件も満足する」をサポートするには、

- ・ 既往の研究文献調査からの知見と専門家の判断
- ・ 限定された概要調査からの知見と専門家の判断
- ・ 類似地点での研究事例からの知見と専門家の判断

が必要である。上記のうち、3 番目のサポートがナチュラルアナログとして期待される分野とな

る。この分野の知見は、従来、ナチュラルアナログとしての取り扱いではなく、地質環境の長期安定性に関する調査研究の一環として実施されてきた。ナチュラルアナログに期待されるゴールとして、以下の研究領域を設定する。

- a. 深部堆積岩の安定性を示すため、露頭している同じ層の鉱物の変質状況を調査する
- b. 局所的な褶曲での岩盤の鉱物と地化学特性の影響を調査する
- c. 岩盤内の亀裂あるいは断層内でのかつての変動による影響の修復性を調査する

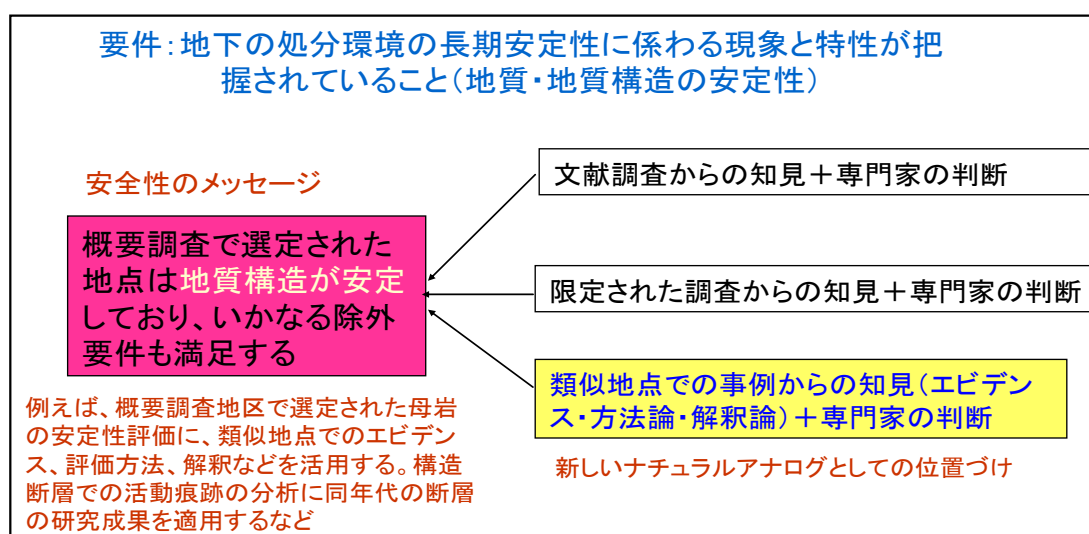


図 3.2-3 地質・地質構造安定性に関わるナチュラルアナログでのアプローチ

② 深部地下水の長期安定性

処分場が位置する母岩周辺の地下水特性の安定性は、地下水移行を基本とした多重バリアシステムにおいて安全性確保の重要な要素となる。深部処分環境での地下水特性が十分把握されていること、環境が長期に維持される地点が選ばれていることは、セーフティケース構築にとって重要な要件となる。文献調査段階から概要調査を経て、段階的に母岩周辺の地下水環境を把握することになるが、その環境の長期安定性を示すことは、限定された期間での調査結果だけでは困難である。その主要な理由は、地下深部の地下水の流れは極めて遅く、数年間の調査では1万年以上に及ぶ安定性を推定するにいたる継続的なエビデンスを示すことは難しいためである。

そこで、類似の岩盤環境での地下水特性、特に地化学特性を対象としたアナログ研究を展開させることで、採取された地下水の分析等の調査結果とシミュレーション結果とを結びつけるロジックを構築していくことを提案する。特に淡水環境下での高濃度の塩水の存在などは、通常の浸透流解析では説明がつかず、類似地点での研究成果に基づく、地下水生成プロセスと地質構造の

変遷の関係、地下水の化学特性と存在鉱物との時間の変遷を含めての反応バランス、古水理学的な地下水流動場の説明など、複合的な要素を統合した解釈が必要とされる。図 3.2-4は、セーフティケースのメッセージとして、「概要調査で選定された地点は、多重バリアシステムにおける地下水移行シナリオの前提となる安定した地下水環境と特性が存在する」ことを目標としたナチュラルアナログに期待するゴールを示している。

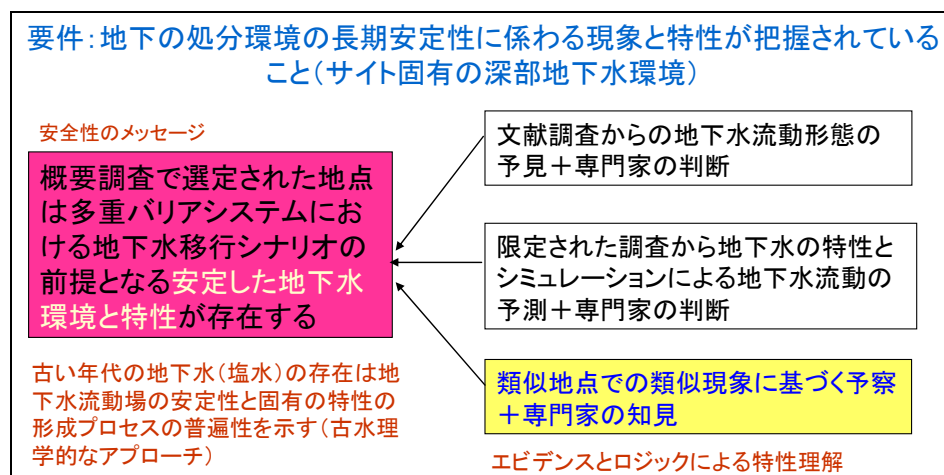


図 3.2-4 深部地下水の安定性に関わるナチュラルアナログ

③ 人工バリアシステム（EBS）の核種保持性

HLWとTRU処分概念では、人工バリアシステムの形状と構成材料が異なるが、基本的には、人工バリアに安定した長期の核種保持性を期待している。HLWでは、ガラス固化体、鋼製オーバーパック、ベントナイト緩衝材から人工バリアシステムが構築されている。図 3.2-5では、セーフティケースのメッセージとして「概要調査で選定された地点における人工バリアの核種保持性能は長期にわたり必要な裕度を有して確保できる」を目標として示した。人工バリアの構成材料の核種保持に関する性能確認試験によるモデル、データベースの作成とともに、それらの妥当性を実証するための類似プロセスの研究、および性能に影響を及ぼすコロイド、微生物、有機物、ガス等の擾乱現象に対する人工バリアシステムとしての長期健全性など安全性に関わる裕度の知見がナチュラルアナログに期待される。

時間の経過とともに、人工バリア材料は劣化・変質していくと想定される。その過程での核種保持性能の評価については、実験室での短時間の試験結果から支配的なメカニズムを把握し、保守的に単純化したモデル化がなされているが、その妥当性については実証されていない。この分野においても何らかのナチュラルアナログ研究への期待が存在する。

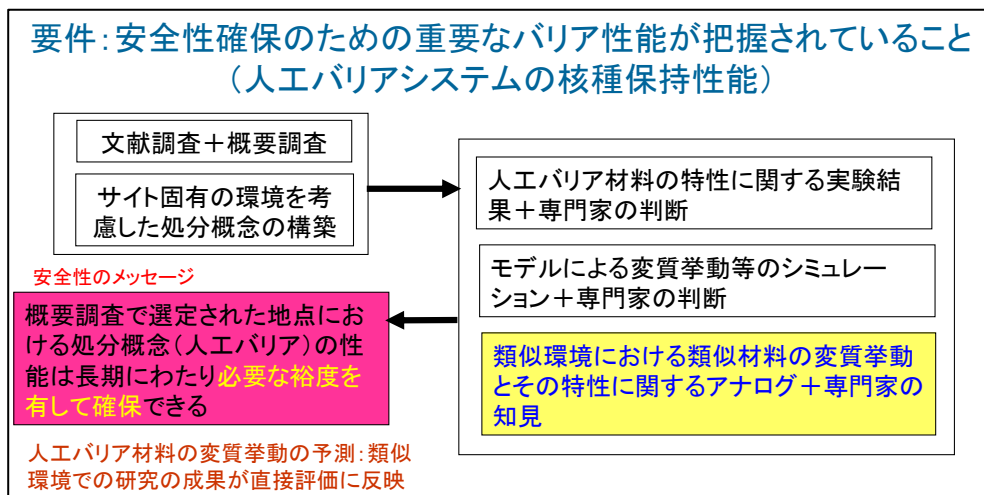


図 3.2-5 人工バリアの核種保持性能に関わるナチュラルアナログ

④ 天然バリアの核種保持性

天然バリアの核種を保持する性能は、長期の安全性確保の上で重要な役割を果たす。しかし、現状の評価では、サイトが特定されない状態で、原位置試験などで得られた知見をもとに、保守的な範囲で簡略化されたモデルとデータベースを用いて解析的なアプローチがなされている。これらの簡略化モデル、およびデータベースについては、その保守的判断の正当性については十分議論されていない。核種保持に関連するプロセスおよび事象のモデル化では、収着、マトリクス拡散、希釈と分散、固定、沈澱等基本的なメカニズムについて多くの研究がなされてきている。一方これらのメカニズムに対するコロイド、微生物、有機物、ガス移行等の影響因子については、未解明な事項が多い。自然界における特にウラン核種の物質移行に関わるナチュラルアナログでは、酸化・還元、高 pH 等の類似環境下での移流・拡散・分散支配の物質移行メカニズムとともに、それらに影響を及ぼす事象についての理解が期待されている。これまでナチュラルアナログとしては最も多くの研究がなされてきた分野でもある。

図 3.2-6では、セーフティケースのメッセージとして「概要調査地区の天然バリア性能は必要な裕度を有して確保できる」を目標とし、類似な環境と評価岩盤での核種移行プロセスに関わる基本的な理解をナチュラルアナログに求めている。

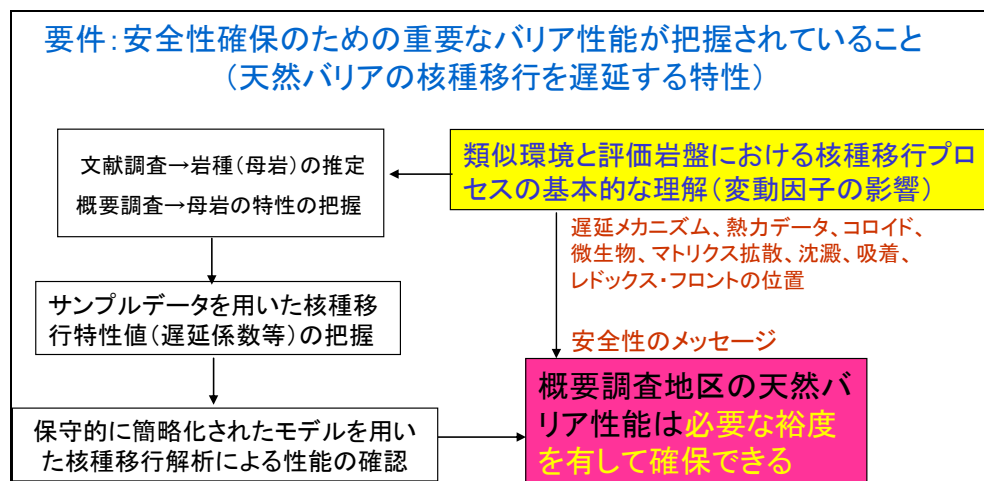


図 3.2-6 天然バリアの核種保持性能に関わるナチュラルアナログ

⑤ 工学的な影響に対する自然界の回復性

地下 300m 以深に建設される地下施設は、その建設段階において、周辺の地質環境（水理場、力学場、化学場等）に影響を及ぼすことが想定される。その影響の程度は、建設工法と周辺岩盤の特性に依存する。特に地下の水理場に与える影響は、地化学特性を含めて閉鎖後も長期にわたりその影響が残ることが想定され、安全評価での初期条件としての地質環境特性を把握する上で、重要な要素となる。

工学的な作業による地質環境への影響の発生とその程度については、地下研究施設の建設を通じてこれまで多くの研究が実施されてきており、影響発生のメカニズムの把握と推定のモデル開発がなされてきた。一方、及ぼした影響が空洞の埋戻し後に回復するかについて、影響発生予測と同じモデルでの時系列的な解析が行なわれているが、地下水流動場の回復とそれに伴う地化学特性場の回復過程については、十分なエビデンスを含めて解明されていない。工学的な時間枠での影響を地質学的な時間枠で論じる必要もあり、従来の地下研究施設での研究だけでなく、類似現象でのメカニズムを研究することもナチュラルアナログとして期待されている。

図 3.2-7 で示したセーフティケースのメッセージは、「工学的な活動による周辺環境への影響は、確実に予測され、その影響は安全評価に反映されている」としており、目標のためには、ナチュラルアナログとしての類似現象の同定とその解釈についてロジックとエビデンスの関連を明確にした上での広範な知見の集積が必要となる。

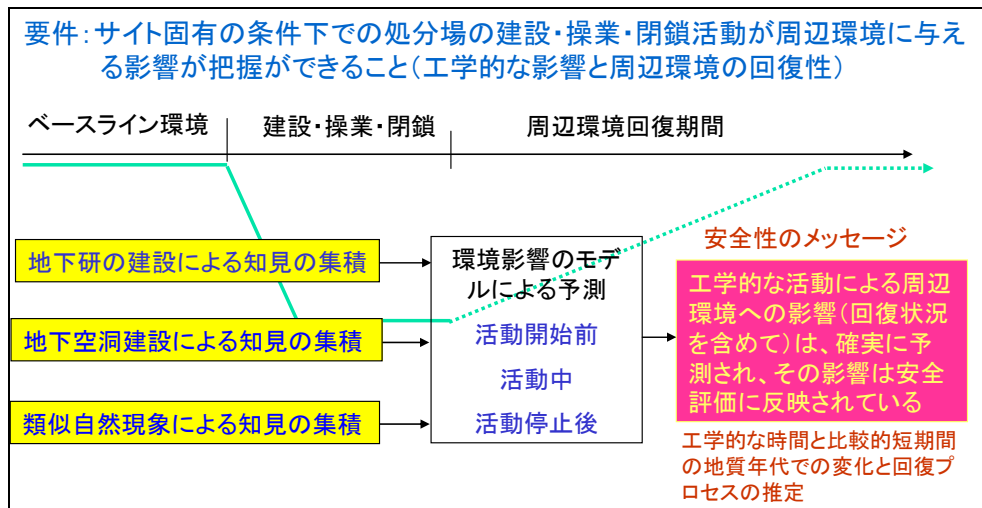


図 3.2-7 工学的な環境影響に関わるナチュラルアナログ

⑥ 地表近傍の変動に対する安全評価モデルのロバスト性

安全性に関わるシナリオのうち、地表近傍で確実に起こる変化については、蓋然性の高いシナリオとして評価モデルに反映されていなければならない。特に沿岸域での地表近傍では、隆起・侵食の影響、サイクリックな氷河期等の気候変動による海水準の変動がもたらす海進／海退による影響を顕著に受ける。その痕跡が自然界で多く観測されている。安全評価では、蓋然性の高い変動を定量化した上で、予測の不確実性を考慮したロバストなモデルを構築する必要がある。ここでのロバストとは、評価モデルの許容範囲が大きいことを意味する。

わが国での立地可能性の高い環境として、沿岸域あるいは島嶼が考えられる。この場合、気候変動による地圏（天然バリア）と生物圏とのインターフェースとなる希釈を期待する滞水層、河川、湖などの領域は、海水面の変動に伴いその環境が大きく変化することが想定される。安全性の担保をこのような領域に期待している場合、その変動に対する安全性の裕度が不可欠となる。

図 3.2-8では、セーフティケースのメッセージ「蓋然性の高い地表近傍での変動を確実に反映したロバスト性のある評価がなされている」を示した。目標について、沿岸地域での類似環境を対象としたナチュラルアナログを用いて、現象の理解と繰り返される事象への将来的な変動予測の確実性が説明できることが期待されている。

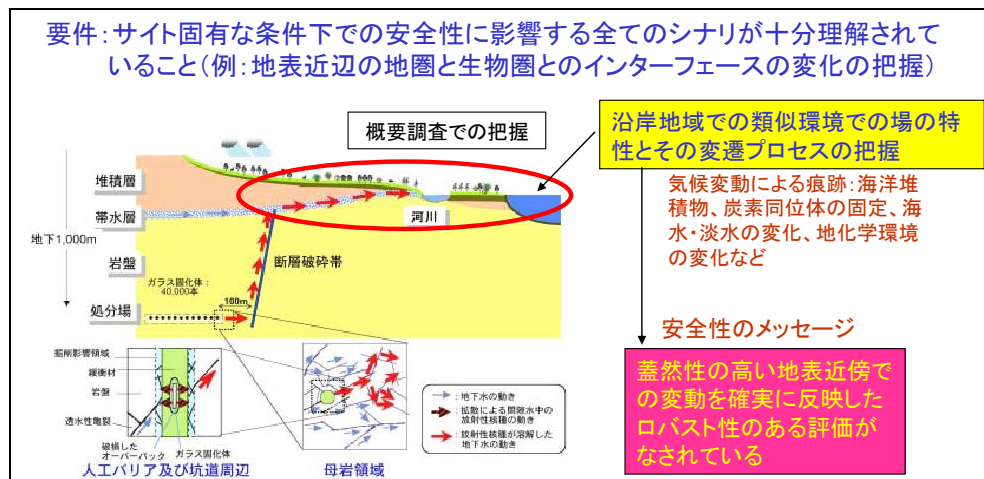


図 3.2-8 地表近傍の変動に関わるナチュラルアナログ

⑦ 人工バリアの長期健全性と形状維持

人工バリアシステムは、複数の材料から構成されている。図 3.2-9 は HLW と TRU 処分概念での人工バリアシステムを例示しているが、セメント系材料とベントナイト材料が同一地下環境で混在した概念となる。同概念が成立するには、人工バリアシステムを構成する材料が、相互の影響を考慮しても長期にわたりシステムとして健全で、必要な形状を維持し、期待される安全機能を保持することが必要である。特に、異種の材料の相互作用による劣化・変質については、その影響の程度と評価モデルへの反映が不可欠となる。

HLW と TRU 処分概念において長期の安全性は、主にベントナイト材の特性に期待する概念である。HLW 概念でのベントナイトは、コンクリート製の支保材あるいは施工中の岩盤安定性を確保するための補強材としての吹付材と密着する。TRU 概念では、ベントナイトがセメント系の材料に内外両側とも接することが想定される。セメント系材料の高アルカリブリュームによるベントナイトの溶解反応はよく知られている現象である。地下環境下での流速が極めて遅い高い pH 地下水流動場のベントナイトと周辺岩盤への影響についての評価が、安全評価の課題の一つとなっている。高 pH よりベントナイトが溶解する場合、密度減少とともにベントナイトに期待されている核種移行の遅延、オーバーバックの支持、コロイドフィルターなどの安全機能が喪失することになる。

図 3.2-9に示したセーフティケースのメッセージ「セメント系材料とベントナイト系材料共存下における人工バリアシステムの形状が長期に維持される」に関しては、類似環境でのナチュラルアナログにその論拠のサポートが期待されている。

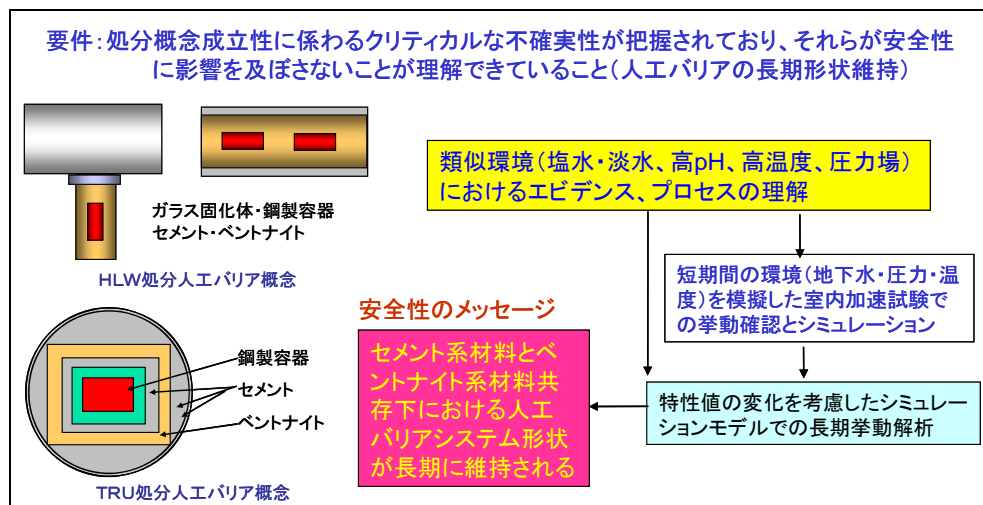


図 3.2-9 人工バリアの長期形状維持に関わるナチュラアナログ

以上、安全論拠からナチュラアナログに期待される事項をベースに、ナチュラアナログがセーフティケースとして活用される場合のゴールを以下の 7 項目に整理することができた。

- ① 母岩を含む地質・地質構造の長期安定性評価に用いる類似地点のエビデンスと判断指標
- ② 深部地下水の長期安定性を示す類似地点での判断指標
- ③ 人工バリアシステムの核種保持に関わる安全機能のエビデンス
- ④ 天然バリアの核種保持性能に関わる安全機能のエビデンス
- ⑤ 工学的な影響に対する自然界の回復能力に関わる自然界のエビデンス
- ⑥ 地表近傍の変動に対する評価のロバスト性に関わるエビデンス
- ⑦ 人工バリアシステムの長期形状維持に関わるエビデンス

(5) まとめと今後の展開

本研究の目的は、わが国における HLW と TRU 処分概念を対象に、ナチュラアナログとして今後取組む分野とそのゴールを設定することであった。結果、セーフティケースの階層構造を構成する要素から、ナチュラアナログに期待する 7 項目を設定し、それぞれについて、ナチュラアナログのゴールを設定した。これらのゴールのうち、優先的に実施すべき事項の検討は、処分事業の進め方と密接に関連する。閉鎖後のセーフティケースへの科学的なアプローチとして、自然界に学ぶナチュラアナログへの期待は極めて大きいことから、今後は本研究で設定した 7

つのゴールに従い、系統的に研究を展開していくことを提言した。

【参考文献】

- 1) 河村秀紀, Ian G. McKinley, 三好悟, 青木和弘 (2007) ; セーフティケースとナチュラルアナログ重点課題, 第 62 回土木学会年次学術講演会講演概要集
- 2) 河村秀紀, Ian G. McKinley, 三好悟, 青木和弘 (2008) ; ナチュラルアナログの重点課題, 日本原子力学会秋の大会
- 3) William Miller, Russell Alexander, Neil Chapman, Ian McKinley, John Smellie (2000): Geological Disposal of Radioactive Wastes & Natural Analogues, Lesson from Nature and Archaeology, PERGAMON
- 4) 核燃料サイクル機構 (2005): 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築ー平成 17 年取りまとめー、分冊 3 安全評価手法の開発

3.3 セーフティケースの統合

(1) 研究の背景

放射性廃棄物の地層処分のセーフティケースについては、OECD/NEA を中心に放射性処分を進める各国で議論されてきた (OECD/NEA, 2004)。そこでの主要な論点は、処分事業を開始するに当たり、様々なステークホルダーに対し、どのように処分の安全性を説明し、意思決定事項の理解と受容を得るかである。そのためには、従来の定量的な安全評価では不十分で、評価をサポートする様々な角度からのエビデンス (Multiple lines of evidence) やロジックの準備が不可欠であり、それらを総合的にセーフティケースとして構築することが規制側より要求されることとなった (IAEA, 2007)。このことは、閉鎖後の放射線学的な安全性に着目したセーフティケースのみならず、その前提となる閉鎖前の安全性や品質保証に着目したセーフティケースとを統合化したセーフティケースの必要性を示唆している。

このような動向は、わが国において 2007 年に改訂された「特定放射性廃棄物処分に関する法律 (最終処分法)」にも見ることができる。改訂最終処分法では、高レベル放射性廃棄物の実施主体に対し、処分場の閉鎖行為の前に閉鎖措置に関する計画を国に提出し、承認を受けることを要求した。この規定は、処分場を閉鎖するにあたり、段階的な処分事業に対応した一貫性のある統合化されたセーフティケース (2.1 節でのセーフティケースの定義を参照) を構築することを求めていることになる。

(2) セーフティケースと安全機能

セーフティケース構築の最初の作業は、処分予定地の地質環境の特性調査を計画することから始まる。調査結果は初期段階の安全評価の前提となり、事業の進展に伴い調査を繰り返すこと、さらに建設や操業期間中モニタリングを行って変化を追跡する行為が閉鎖につながる行為として位置付けられる。

高レベル放射性廃棄物処分における閉鎖後のセーフティケースの根幹となる要素は、人工バリアシステムの特性である。例えば、ベントナイト緩衝材の安全機能と呼ばれている「低透水性」「コロイドフィルター性」「応力緩衝性」「オーバーパック支持性」など (JAEA 1999) が挙げられる。これらの安全機能が期待通りの性能を発揮することで、長期の安全性が担保されセーフティケースの論拠になるため、人工バリアを構築する操業段階での品質保証がセーフティケースの前提とされる。前節でも示したが、処分場を閉鎖するまでは、「アクティブ・セーフティ」と呼ば

れる技術的な可能なあらゆる手段を講じて安全性に係る行為を展開し、閉鎖後は「パッシブ・セーフティ」と呼ばれる人間の関与が必要のない、いわば制度的管理を必要としない安全確保の状態とすることが地層処分の要件である。したがって、統合化されたセーフティケースとは、処分場をアクティブ・セーフティからパッシブ・セーフティに移行するために必要とされる論拠の集合体と定義することができる。

図 3.3-1の模式図は、HLW処分における人工バリアを含む周辺の水理環境の変遷をイメージ的に示したものである。処分場の建設前の調査段階から開始され、建設中、人工バリアの構築、埋め戻し、処分場の閉鎖プロセスでの状態変遷を時系列的に記述することで、着目する状態がどのように変遷していくかを分りやすく提示している。処分場の許認可申請段階で作成されたセーフティケースは、建設・操業段階で見直され（安全レビュー）、処分場の閉鎖前に最終的なセーフティケースを確認したのち、パッシブな安全確保に移行する様子を示している。このような模式図は、人工バリアを中心とした状態変化を理解するために作成するもので、詳細な分析を行う出発点あるいは関連する多くの専門家が共通の問題意識のもとに議論を行うプラットフォームとしての役割を果たすことができる。本論文では第5章で、このような図を「ストーリーボード」と定義した。

本節におけるセーフティケースの統合化研究では、まず、閉鎖前でのセーフティケースに関する行為と閉鎖後のセーフティケースに関連する行為を統合化するための、共通の指標について考察し、その具体的な適用について、高レベル放射性廃棄物処分で想定される現実的な操業概念をベースに分析した結果を取りまとめる。

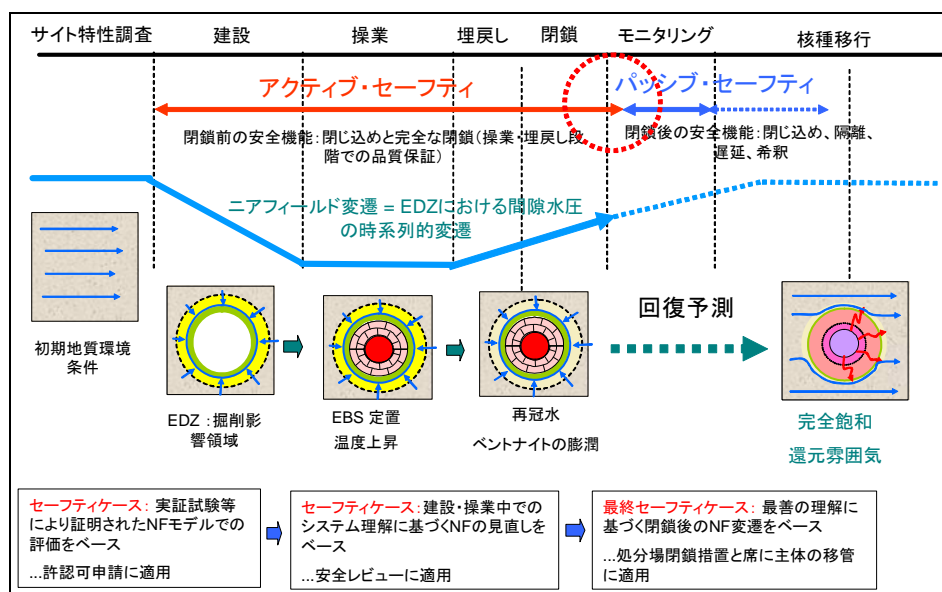


図 3.3-1 閉鎖前のセーフティケースから閉鎖後のセーフティケースへの模式図

(3) セーフティケースの統合化に向けての指標

現在、わが国の高レベル放射性廃棄物処分事業では、公募による文献調査地区の選定が進められている（原環機構、2002）。公募を開始する前提には、1999年にサイクル機構が公表したジェネリックな地質環境を対象とする人工バリアを中心とした処分の安全確保の考え方（JNC 第2次取りまとめ、1999）を根拠としている。すなわち、極めて頑健性のある材料で構築される人工バリアシステムを導入することで、多様な地質環境での立地の選択の幅を広げることが可能とする報告書である。このことは、火山や断層活動など、人工バリアシステムの健全性を喪失させることのない地区が選択されれば、HLW 処分は広い範囲で実現可能であるというメッセージを、長期の安全評価の結果で明示したことを意味する（Kitayama et al.,2007）。

NagraのHLW処分を対象とした長期の安全評価の結果では、図 3.3-2に示すように被曝線量のピークの最大値（基本シナリオでは黒の実線が対応）が出現するのは処分場閉鎖後、10 万年以降、100 万年ごろであり、その値は規制側が求める安全レベルに比較して大きく下回っていることで処分の安全性へのメッセージとしている。解析的に求められるこの値は、潜在的な放射線学的リスク値であり、地元住民が処分の受入を判断するための指標として理解することは容易でなく、むしろ、処分場の建設・操業中の事故や災害からの直接的なリスクへの関心が高いと想定される。

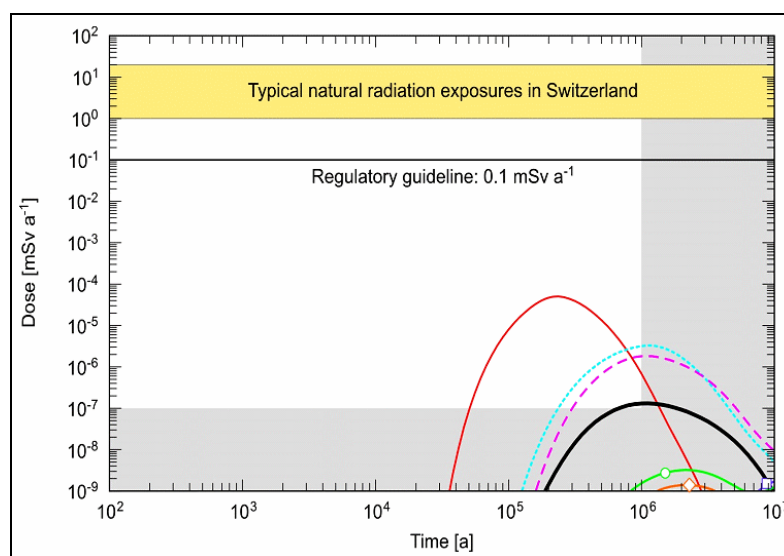


図 3.3-2 将来的な潜在的な被曝線量の表示例（Nagra, EN-2002）

処分の技術的な実現性を明示することを目的に研究された第2次取りまとめにおける安全評価では、図 3.3-3左図に示すように極めて簡略化された環境を仮定しており、想定される現実の処分環境（右図）は考慮していない。閉鎖後のセーフティケースを構築するためには、その前提とな

る閉鎖前の状態を現実的に評価することで、長期の評価の不確実性の幅を小さくできる可能性がある。長期の評価においては、オーバーパックスの1,000年間の完全な閉じ込め機能、周辺のベントナイト緩衝材の核種を閉じ込める、あるいはその移動を遅延させる機能、さらに周辺の天然バリアでの核種の移動を遅延させ、また希釈する機能などが「安全機能」として期待されている。すなわち、安全評価はこれらの安全機能が問題なく構築され、想定される内外の擾乱があったとしても長期にわたり維持されることを仮定した解析である。その仮定の正当性については、室内での実験や原位置での試験、自然界にある類似現象の観察、プロセスをシミュレーションするモデルによる解析結果等を用いて説明がなされてきた。さらに、影響解析を行う上では、長期の評価を定量的に扱うために、前述した安全機能の長期性能の評価に着目することで、系の複雑さを避け、対象とする現象を単純化し、特性を保守的にとらえたモデルやパラメータ設定が実施されてきた。

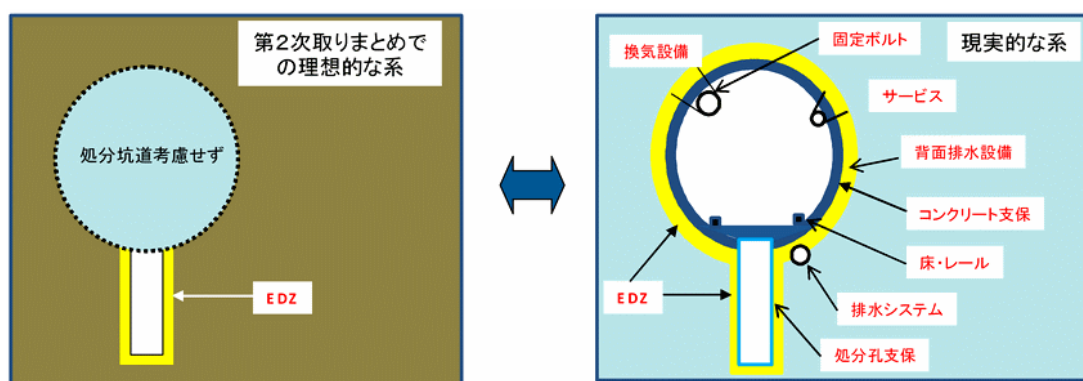


図 3.3-3 第2次取りまとめでの簡略化モデル（左図）と現実的な処分環境（右図）
(Kawamura et al., 2008)

セーフティケースでは、これまでの安全評価のアプローチをさらに一歩進め、前提としていた事項を含めた総合的な評価や判断を実施することを目標としている。セーフティケースの最終目標は、前述したように「処分の安全性を示す」、「安全性を理解し受け容れてもらう」ことである。既存の安全評価では、前者に重点をおき、その実現性に集約した研究が実施されてきた。一方、後者の目標を達成するには、処分事業そのものに対する理解が必要となり、また安全への具体的な取組みの姿勢を見せることが不可欠となる。特に原子力産業では、これまで大小の事故があり、そのつど原子力の安全性に対する受容が失われてきた現実がある。安全文化の欠如が叫ばれている一方で多くの国民は、不信感を抱きつつ必要性から原子力エネルギーを受け容れてきた現実がある。その背景には、事故が起きたとしても、周辺への影響を及ぼす前に対応策が実施されると

いう技術的な対処と制度的な管理の仕組み、および規制主体を含めた責任主体が準備されていることに対する信頼感が時間をかけて醸成されてきている（「コンフィデンス・ビルディング」と呼ぶ、IAEA, 2002）からである。

放射性廃棄物処分の分野では、信頼感をどのように醸成していくのが最も大きな課題とされているが、処分場を受け入れる住民にとっては、処分の安全確保の基本としている「人間が関与しない仕組みによる極めて長期の安全性確保」よりも、「人間が直接関与する建設や操業時の安全性」により一層関心があると思われる。

放射性廃棄物処分では関連する多くのステークホルダーが存在することもあり、長期の安全性をその前提や仮定、判断を含め、正当化された方法で示すこと、閉鎖前の安全性に対する具体的な対応を示すこと、それらが処分全体の安全性につながることを分かりやすく説明する、統合化されたセーフティケースの構築が求められている。

統合化されたセーフティケースでは、様々なターゲットに答えを準備することになるため、対象によって解答の最適化をはかる必要がある。科学・工学的な分野での最適化においては、1980年代の後半に ALARA (As low as Reasonably Achievable, IAEA 1989) という基本理念が提示された。この概念は、処分の潜在的なリスクを実現可能な範囲で小さくすることを求めている。実現可能性には、経済性の制約も含まれるが、安全性と経済性をトレードオフすることの正当性の議論も当然ながら発生し、どのレベルを目標とするのか具体的なターゲットについては提言を含めなされてきていない。処分事業がより現実的な段階になるにつれ、この ALARA の理念は、処分に“Best Practice” または “Best Available Technology” な技術を適用する要件に変化してきた。ここではその制約として 経済性が強調されてきている（BATNEEC; Best Available Technology Not Entailing Excessive Costs – Sorrell, 2002）。つまり、極めて長期の安全確保（パッシブ・セーフティ）の最適化とは、パッシブな状態に移行するまでの各段階において、事業として成立する範囲で最善の努力をすることが最適化の理念となる。この理念は、原環機構の構造化アプローチの思想にも反映されている（原環機構、2007）。

各段階で最善を尽くすこと（BAT）は、段階的な処分地選定における処分概念の最適化アプローチと良く一致し、閉鎖前のセーフティケースと閉鎖後のセーフティケースとの統合化を図る共通の指標の一つとしてとらえることができる。

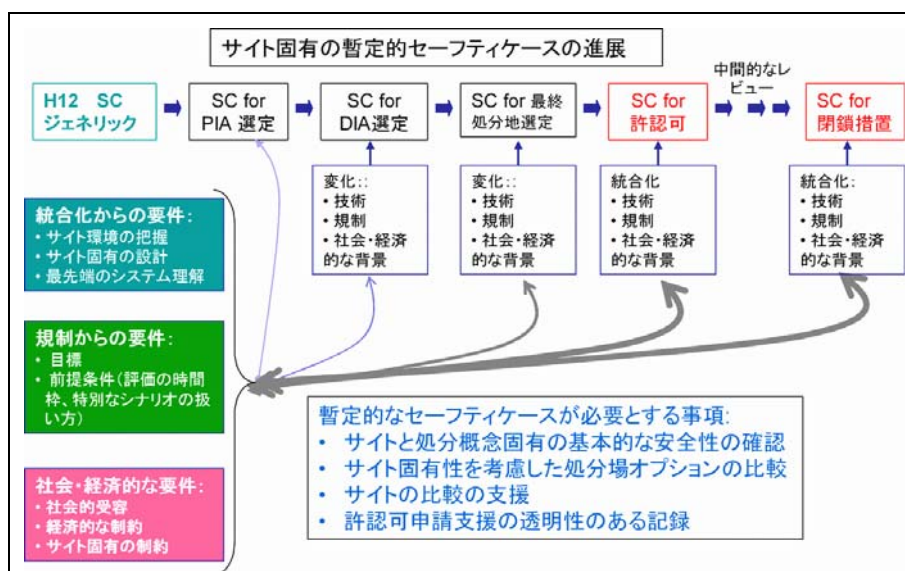
(4) 統合化されたセーフティケースの段階的な変遷

図 3.3-4に示すように、わが国における高レベル放射性廃棄物処分事業は、許認可を得るまで段

階的な処分予定地の選定が計画されている。実施主体は、各段階で明確に設定されるマイルストーンに従い、限定された情報の中で、厳格な意思決定を実施することが求められている。その作業の中核となるのが、統合化されたセーフティケースの構築である。

初期段階でのセーフティケースでは、不十分な情報のもとで作成されることから、多くの不確実性が存在することになり、意思決定は専門家の判断に依存する事項が多くなる。これらの決定事項は、段階的な進展に伴い見直され、再評価されることになる。統合化されたセーフティケース構築で重要なことは、意思決定された事項を様々な知識レベルと要件を有するステークホルダーに理解してもらうこと、また、決定事項を受け容れてもらうための内容と手段をバランスよく準備することである。このことは、意思決定の指標として、技術基準等を満足しているだけでは不十分であり、前述した BAT のほかに、意思決定し、評価したことがそれぞれのステークホルダーにとってどのような意味を持つのかを説明するための手段の準備が求められる。

技術的な観点からは、統合化されたセーフティケースとして、処分場概念の最適化を図っていく場合、バリア性能の相乗効果を最大とするように構成要素の絞込みを計るか、または同調モードでのバリア破壊のリスクを最小とするための設計・評価上の工夫をすることが重要となる。このことは、長期の安全性確保につながる人工バリアの性能設計における原則となる（Kawamura et al.,2008）



統合化されたセーフティケースで取り扱う扱う事項は、例えば、下記の評価事項等が対象となる。

- ・ 建設・作業時の影響評価：閉鎖前のセーフティケースに対応
- ・ 人工バリアシステムの変遷評価：人工バリアシステムの安全機能に関連する事項（次節で詳述）
- ・ 地圏の変遷評価：バリア変遷を考慮した核種移行評価
- ・ 生物圏の変遷評価：生物圏の変遷を考慮した核種移行評価
- ・ 外的な擾乱因子の影響評価：天然事象のバリア安全機能への影響評価
- ・ 上記の評価を支援する論拠：エビデンスやナチュラルアナログなどによる評価の前提・モデル等の妥当性支援
- ・ 閉鎖措置計画とモニタリング：セーフティケースのレビューと確認
- ・ 処分候補サイトの考慮事項：選定時の考慮事項に対応した評価

これらの事項がセーフティケースの中核となり、段階的に進められる処分事業に対応して内容と詳細度が高められる。表 3.3-1 に統合化されたセーフティケースでの記載事項の段階的な進展について考察した結果を提示する。

表 3.3-1 統合化されたセーフティケースに記載される事項の進展例

	文献調査段階 (PIA 選定)	概要調査段階 (DIA選定)	精密調査段階 (最終処分地選定)	許認可申請段階
建設・作業の影響評価 (前提と長期)	長期の評価に影響を与える懸案事項、因子の抽出	閉鎖後安全性に影響を与える作業時のシナリオ評価 サイト固有の建設・作業時のリスク評価	閉鎖後安全性に影響を与える全てのシナリオ評価 建設・作業時のセーフティケースのためのシナリオ設定	閉鎖後安全性に影響を及ぼす全てのシナリオ(処分概念固有) 建設・作業時のセーフティケース構築
人工バリアシステムの評価	H12での仮定をベース。想定されるサイト環境での安全機能への影響因子を抽出、定性的な議論	サイト固有の安全機能の設定とそれらに影響を及ぼす因子の設定。概略評価による受け入れ性と実現性の確認	現実的なシナリオの設定と影響解析および実現可能性の実証試験からの完全性追求(最適化)と主要な影響因子の分析・評価	サイト固有のデータと実証技術に基づいた人工バリアの長期変遷と安全機能の評価
地圏の評価	H12の手法をベースとした人工バリア周辺の環境に着目した大規模的な核種移行挙動の評価、影響因子の抽出	サイト固有・現実的な評価をベース。人工バリアへの影響因子を全て評価核種移行解析へ反映	サイト固有の変遷モデル(SDM)を基本としたEBSを含めた全体核種移行解析(モデルデータの原位置での確認)	実証された手法による処分場全体を対象とした現実的な安全評価とEBS地圏に影響を与える全ての事象の評価
生物圏の評価	サイトの立地環境を考慮した生物圏の理解と様式化した概略評価(H12の適用性評価)	サイト固有で現実的な生物圏モデル作成と核種移行評価。様式化した変動モデル準備	サイト固有で現実的な生物圏核種移行評価。様式化した変動モデルの変動幅評価	サイト固有で現実的な生物圏核種移行評価。様式化した変動モデルでの移行解析
外的擾乱の影響評価	サイト固有の天然事象の把握。評価の方法の準備。調査計画への反映	サイト固有の天然事象のシナリオ化と概略影響評価、調査計画への反映	サイト固有の天然事象が安全機能に与える影響評価(シナリオの分類への反映)	安全評価シナリオとして、天然事象の影響評価
評価を支援する論拠の準備	一般的にナチュラル・アナログ等での安全性の説明や考古学的なエビデンスでの現象理解	サイト特性と概念固有のナチュラル・アナログ。安全機能の長期安定性を示すエビデンス。実証試験、フラックス	安全評価の論拠となる多分野のエビデンスの準備(ナチュラル・アナログ、考古学、フラックス)。処分技術の実証試験、品質保証の確実性	安全評価を支援する網羅的な論拠。処分技術の信頼性・合理的な実現性を示す実証試験。閉鎖措置に向けた準備。
閉鎖措置計画とモニタリング	H12概念による閉鎖概念の提示とベースラインモニタリングの計画	サイト固有の閉鎖概念と次段階のモニタリング計画(NF、FF)	サイト固有のモニタリングと閉鎖概念及び関連技術の実証	閉鎖措置計画立案に対応したサイト固有のモニタリングと閉鎖設計。
サイト間の考慮事項	サイトの適性を評価するSC要素としての概略評価	重要な意思決定につながる要素として厳密に評価(地元参加の方策提示)	事業の最適化の観点からの評価(地元参加の体制とコミュニケーション)	閉鎖措置・事業停止段階前を視野に入れた評価:事業への地元のコミットを具体化

(5) 統合化されたセーフティケースの活用：人工バリアの定置への品質要件

統合化されたセーフティケースの活用で重要なことは、様々なステークホルダーへの安全に関

する説明だけでなく、処分場概念やサイトの調査・評価および安全評価へのフィードバックがある。本節では、統合化されたセーフティケースの一例として、HLW 処分における人工バリアの定置を対象とした研究結果を提示する。

サイトが特定されていない現状では、セーフティケースのスタートは、図 3.3-5に示す原環機構が示した概念を用いることとする。人工バリアシステムは、処分孔への縦置き定置と処分坑道への横置き定置の概念が例示されている。

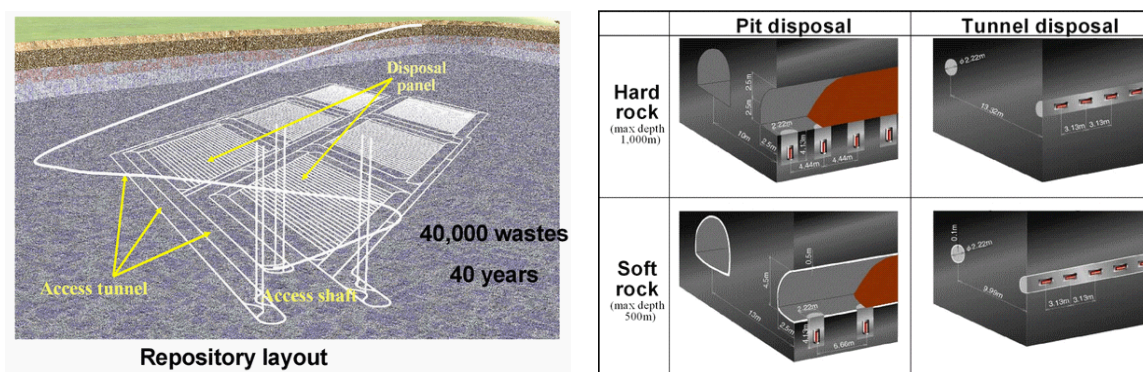


図 3.3-5 原環機構が例示した処分場と人工バリア概念 (NUMO TR-04-02)

将来的に処分場が立地する可能性のある地質環境としては、図 3.3-6に示す内陸丘陵、内陸平野、沿岸、沖合い、島嶼などが想定される（原環機構、2004）。

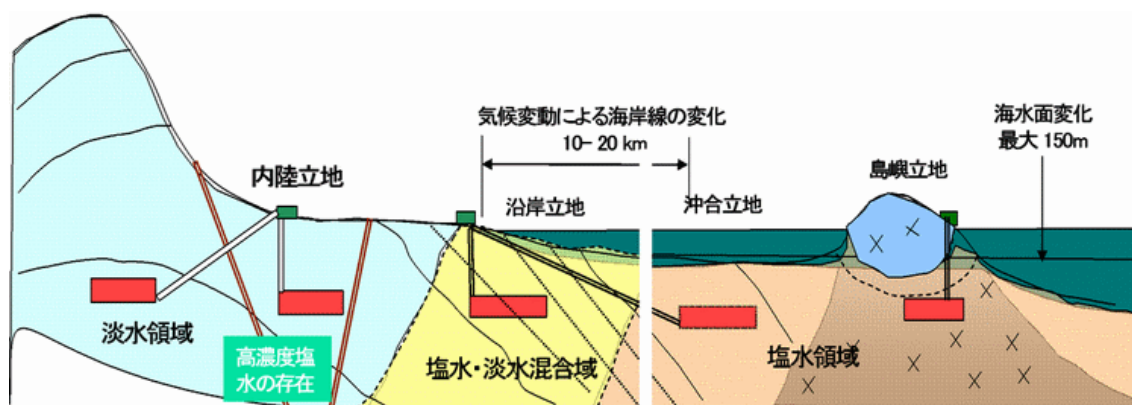


図 3.3-6 処分場の想定立地環境

第2次取りまとめでの安全評価では、処分場の形態や人工バリアの定置方式の違いについては考慮されていない。前述したように、全てが期待通りの品質で構築されることを前提に、理想的

な系での評価である。第2次取りまとめ以降、人工バリアの定置方式については、前節でも示した10ケースが検討されており(Asano, 2004)、定置のための要素技術の開発が進められている。

しかし、安全評価で扱う核種移行モデルは、現状では簡略化された1次元モデルであり、そこでは形状の違いは考慮できず、このような定置方式の違いをモデル化できるレベルに至っていない。したがって特に定置直後から周辺環境が落ち着く数100年後までのプロセスでは、人工バリアに用いる材料や施工の違いによる差が存在することを考慮しておく必要がある。

統合化されたセーフティケースでは、前述したように、人工バリアの定置環境の把握から、定置段階での安全や品質確保に関する評価が、閉鎖前のセーフティケースとして不可欠な情報となる。通常時においては、建設中の安全確保のために実施されるコンクリートのグラウトや水抜きなどの行為、事故や災害およびトラブルによる人工バリア品質への直接的な影響と環境回復や修復により残存する影響等が挙げられる。

一方、処分場閉鎖後のセーフティケースの構築において、人工バリアシステムでの安全機能として、ベントナイト緩衝材が有する以下に示す様々な特質が最も期待されている(サイクル機構,1999)。

- ・ 止水性
- ・ コロイドろ過性
- ・ 自己シール性
- ・ 製作・施工性
- ・ オーバーパック支持性
- ・ 応力・化学緩衝性

これらの特質を左右するのは、図 3.3-7に示すように、ベントナイトの成分、密度および幾何形状(厚さ)であり、閉鎖前から閉鎖後にかけてこれらの特質が担保されることがセーフティケース構築の要件とすることができる(Kawamura et al., 2008)。

緩衝材への要件	必要な特性	品質での対応
a. 止水性	低透水特性	成分、密度、厚さ
b. コロイドろ過性	フィルター効果	成分、密度、厚さ
c. 自己シール性	膨潤性	成分、密度、量
d. 製作・施工性	最適含水比	成分、密度、形状
e. OP支持性	強度	成分、密度、厚さ
f. 応力・化学緩衝性	変形特性・鉱物	成分、密度、厚さ

JNC TN1400 2005-015 緩衝材の性能保証に関する整理表より



➤成分:モンモリロナイト含有率
・全体としての平均含有率
・空間的なバラツキ
・時間の経過に伴う変質

➤密度:乾燥密度、飽和度
・全体としての平均密度、飽和度
・空間的な偏在
・隙間
・時間の経過に伴う変化

➤幾何学形状:厚さ、量
・初期の変形可能性(変形性)
・時間の経過に伴う変形



多様な定置方法に対する
施工時品質確認指標
への展開

	ブロック	ペレット	原位置締固	PEM
縦置概念				
横置概念				

図 3.3-7 ベントナイト緩衝材に期待される特質

上図に示したベントナイト緩衝材を含む人工バリアシステムを構築する場合に、閉鎖前のセーフティケースとして考慮すべき事項は、人工バリアが設置される初期の環境状態と定置時の安全・品質確保となる。多様な地質環境を対象としている現時点では、処分場の立地環境として、第2次取りまとめで仮定された均質の堆積岩や結晶質岩モデルのような単純な系は実在しない。そのため、図 3.3-8に示すように沿岸での複雑な付加体への立地、島嶼での亀裂が卓越した環境への立地なども可能性あるサイトとして考慮しておく必要がある。

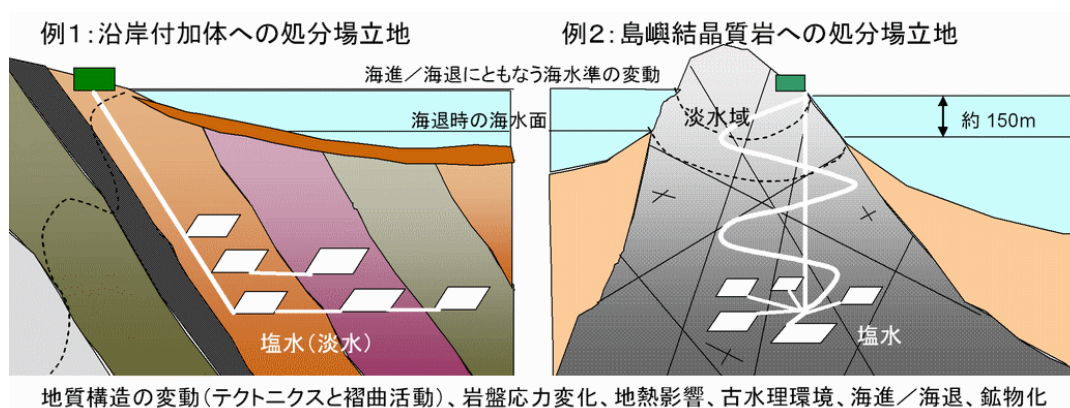


図 3.3-8 立地の可能性が高い地質環境例と処分場レイアウト

このような場所への人工バリアの定置環境は、図 3.3-9に示すような人工バリア以外の材料がバリアの性能を担保するために設置され、これらの材料の多くは処分場閉鎖後も残置されることになる。

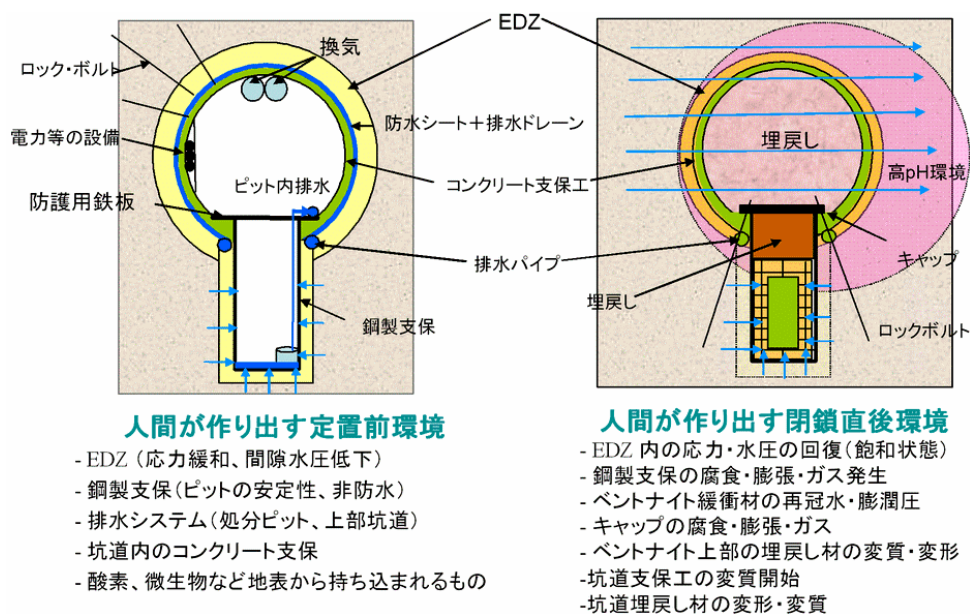


図 3.3-9 実際の人工バリア定置環境と閉鎖直後の人工バリア周辺環境

この初期状態が図 3.3-10に示すように、豎置きの場合（上段）および横置きの場合（下段）のどちらも時間の経過とともに3次元的に変遷していく。前述したように、閉鎖後の安全評価で扱う1次元の単純な系にはならないため、単純化が必ずしも保守的になっているとは限らない。人工バリアシステムに着目した統合化されたセーフティケースの構築では、ベントナイトの特性の変化が最も重要な要素となることから、その定置環境の変遷と共に、人工バリアの変質や劣化に伴う特性の変遷についても考慮した評価が必要とされる。

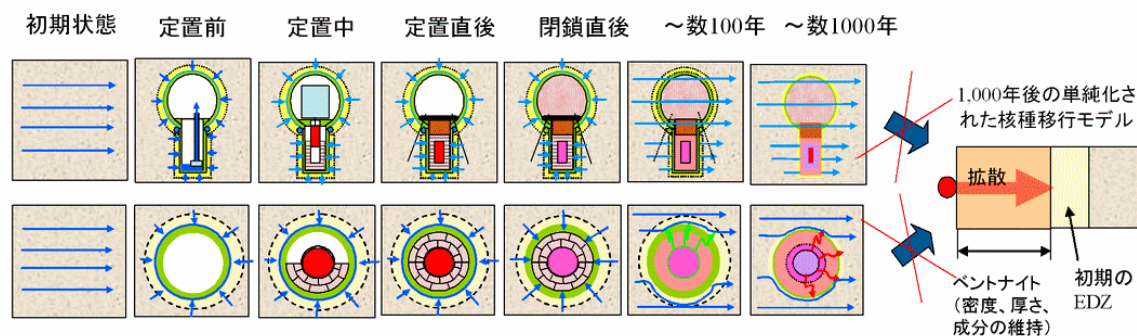


図 3.3-10 人工バリアの初期状態からの状態変遷と単純化モデルとの差

(6) 統合化セーフティケースへの要件

本節では、統合化されたセーフティケースを構築するにあたり、工学的な観点からセーフティケースへの要件について考察する。工学的な課題を解決することは、長期の評価での不確実性を削減できることを提言してきた。工学的な課題を解決する最良の方法は、技術的に実現できる複数の回答の比較である。不確実性を削減する観点から、以下に示す様々な視点での指標が想定される。

- ・ 作業の結果として残置される材料を最少とする視点
- ・ 想定される擾乱に対する耐久性の視点
- ・ 回収や修復の容易さの視点

図 3.3-11は、上記の視点に基づき、処分坑道縦置き形式の場合のオーバーパックの定置方法について、比較した例である。左の吊り下げカラーを用いる方法では、作業時のオーバーパックの落下の可能性を否定することができず、安全操作の観点からは、右の支持プレートを用いた定置方式が優れている。しかし、支持プレートが定置後残置されること、支持プレートを吊り下げるためのワイヤーの空間が必要になることから、隙間の処理が必要となることなど、閉鎖後の安全性に係る課題が残される。

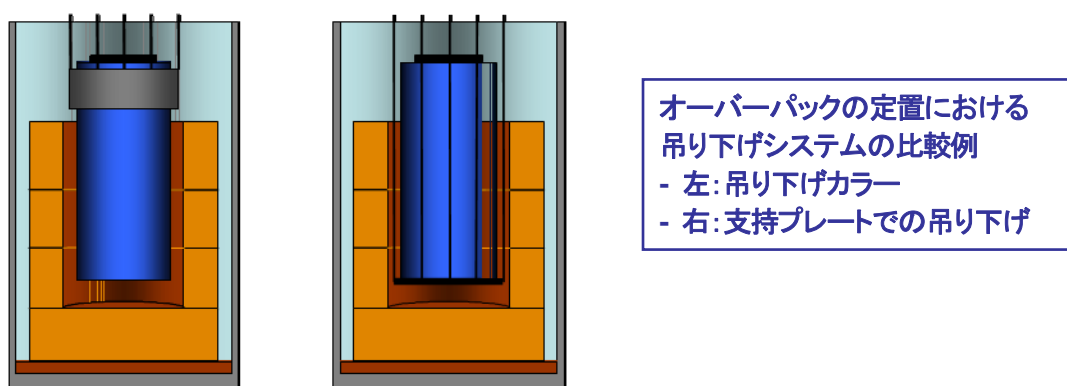


図 3.3-11 オーバーパックの定置方法の違いによる工学的なセーフティケースへの要件

表 3.3-2では、さらに比較の指標として設定した8つの要件（原環機構の研究では「設計因子」と呼ぶ：NUMO TR-04-01, 2004）を例示している。設計因子は、処分場の概念オプションや定置方式の比較を行う場合の、トップダウン的な評価の視点として用いることができる。また、様々な視点での工学的な課題の解決度を比較することで、閉鎖後のセーフティケースでの不確実性を小さくすることが可能となる。

これらの要件のなかには、相反する要素、例えば、安全性と経済性などの要件、また、社会的受容のように定量化できない要素も含まれている。従って、これらの設計因子は、様々なステークホルダーの意思決定に対し、処分の閉鎖前と閉鎖後の安全性の確保とともに事業としての成立性も視野に入れた要件となっており、統合化したセーフティケースへの要件にも適応可能である。

表 3.3-2 セーフティケース構築への要件（設計因子：原環機構,2004）

1	長期安全性	閉鎖後のセーフティケースのロバスト性
2	操業安全性	建設・操業・閉鎖作業時の安全と放射線学的な安全性
3	工学的実現性	所定の品質目標に対する建設・操業の実現性
4	工学的信頼性	操業環境と制約下での実施可能性と想定擾乱への頑健性
5	サイト調査性	サイト特性調査とモニタリングデータへの要件の実現性
6	回収可能性	定置後の容易な回収性
7	環境影響程度	処分事業に伴う全ての環境影響の範囲
8	社会・政治および経済性	全てのステークホルダーの受容性とコストへの影響度

表 3.3-3では、セーフティケースへの要件を用いて、人工バリアシステム（EBS）定置への要件に展開し、達成度を評価するための指標を設定した。直接的な指標に、閉鎖後安全性では初期欠陥の排除としての要件として人工バリアの施工品質を取り上げ、その直接的な指標としてベントナイトの密度、厚保さ、成分などを設定した。また、閉鎖後安全性への要件として、残置材料の影響削減を取り上げ、関連する指標として支保工、ドレーンシステムなどに用いる材料特性を設定した。

このように、評価指標としての設計因子は、トップダウン的に要件から評価の直接的な指標および関連する指標にブレークダウンされ、要素技術レベルへの評価まで展開できる。図 3.3-12は、その一例として操業システムの成立性に関連する要件から要素技術の評価までの枠組みについて、階層構造的に示したものである。この階層構造は、前述した閉鎖前のセーフティケースと閉鎖後のセーフティケースを、操業システムという具体的な対象で統合化するために作成されている（Kawamura et al., 2008）。操業システムの成立性は、前述の8つの設計因子で総合的に評価されることになり、これらの設計因子が統合化した搬送・定置システムを評価する要件となる。さらに、システムとしての成立性を評価するための要件が、前述のベントナイトの初期品質等具体的に設定され、ベントナイトを設置する要素技術が評価される。評価指標がベントナイトの密度や厚さなどになり、それぞれについて、定量的な目標値が設定され、要素技術の達成レベルが評

価される。トップダウン的な要件で設定される目標レベルに対し、ボトムアップ的にその達成度を評価しつつ統合化されたシステムを構築し、システムとしての達成度が評価され最終的にシステムとしての成立性が設計因子で評価される構造を示している。

表 3.3-3 人工バリア定置への要件と要件への達成度を評価する指標 (Kawamura et al., 2008)

評価指標	EBS 定置技術への要件	直接的な指標	関連する指標
閉鎖後安全性	初期欠陥の排除: 人工バリア材の初期施工品質、周辺環境の把握、残置材料の影響削減	ベントナイト: 密度、厚さ、成分 オーバーバック: 溶接 EDZ: 地下水浸透量	残置する材料の影響度: 支保工、ドレーンシステム、キャップ、埋め戻し材
作業時安全性	事故・災害の発生可能性の削減、影響の削減、影響の安全・確実な修復	回復・修復の容易さ、汚染物質の回収の容易さ	作業システムの複雑性、作業ステップの数、事故時の人間の介入程度
技術的実現性	建設と関連する設備、製作・加工、搬入・搬送、定置、検査技術、物流	装置・システムの性能: 精度、スピード、要求品質達成度	作業装置の複雑性(構成部品の数)、物流システムの合理性 品質保証の容易さ
工学的信頼性	擾乱に対する脆弱性の排除: ドレーン・換気システム、電力、連続作業	装置とシステムのロバスト性: フェイル・セーフ、バックアップ、冗長性	必要な修復に必要なサービスが喪失するまでの許容時間、柔軟性
サイト特性評価／モニタリング	定置環境の把握と制御(ドレーンシステム、EDZ)	定置中の地下水浸透速度、EDZの応力場と地下水流動特性	擾乱された環境に対する作業関連システムの脆弱性
回収性	回収の実現性、検知システムの確実性	容易で安全な回収システム、周辺バリアへの影響削減、連続定置中の異常検知システム	遠隔回収装置の複雑性、人間の介入レベル
環境への影響	処分環境や周辺環境への影響が無いこと	排水、掘削ズリ、被曝	作業の範囲(物流システム)
経済性	予算内のコスト、不確実性に対する感度の小ささ	処分に係る全コスト	環境維持、製作・加工、搬送、定置・検査、回収・修復のコスト

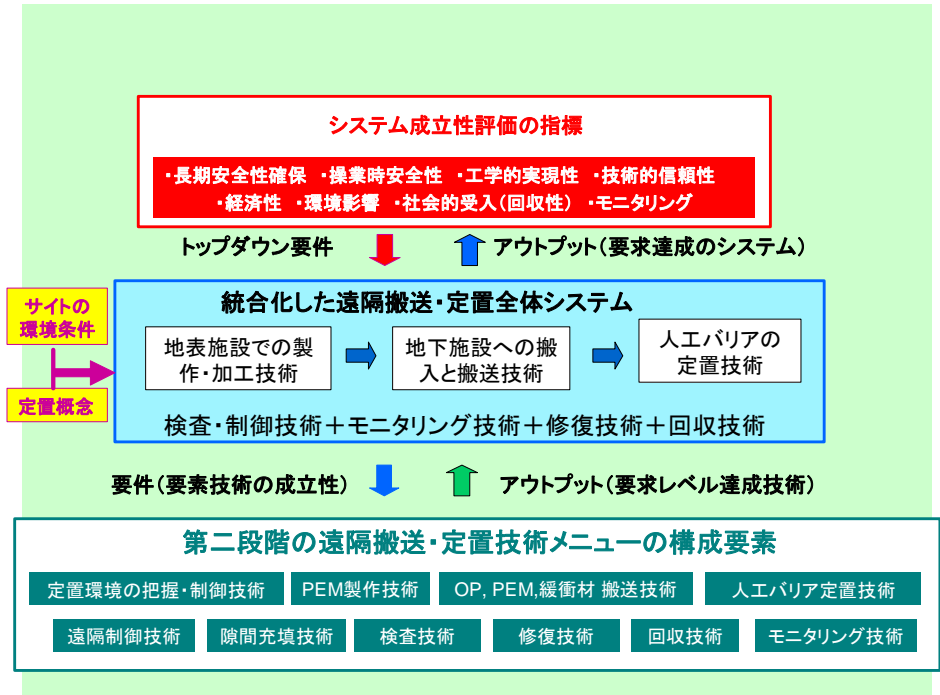


図 3.3-12 統合化セーフティケースをベースとしたシステム成立性評価の階層構造例

(7) まとめと今後の展開

本節では、閉鎖後の安全性に着目していたセーフティケースに対し、閉鎖前の安全性や品質保証を含め、統合化したセーフティケースの概念を構築した。具体的な研究の対象として、処分場や人工バリアシステムへの要件をセーフティケース構築の視点から設定し、長期の安全性と実現性とのバランスを考慮し、様々なステークホルダーが参画できる多面的な要素を備えたセーフティケース構築に向けての手法を提案した。

現状では、処分予定地が決まっていないが、多様な立地環境を想定し、そこでの特徴に対応した安全概念の研究が進められている。安全概念と並行して処分場の概念や人工バリアシステムが準備されていくことになり、長期の安全評価のみならず、本章で提案した統合化されたセーフティケース構築に向けて、安全で品質確保でできる技術が、その評価手法と指標とともに段階的に適用されていくことが予定されている。

【参考文献】

- 1) JNC (2000): Second Progress Report on Research and Development for the Geological Disposal of HLW in Japan, H12: Project Overview Report, JNC TN1410 2000-001, Japan Nuclear Cycle Development Institute, Tokai Japan
- 2) Kitayama, K., Ishiguro, K., Takeuchi, M., Wakasugi, K., Strategy for safety case development (2007): impact of a volunteer approach to siting a Japanese HLW repository. Proc. NEA workshop Safety cases for the deep disposal of radioactive waste: where do we stand. NEA, Paris, France
- 3) Kawamura, H., Mc Kinley, I.G., Neall, F.B. (2006): Challenges for tele-handled emplacement of the EBS for Japanese HLW. Proc. 2006 International High Level Radioactive Waste Management Conference
- 4) NEA (2004): Post-closure Safety Case for Geological Repositories - Nature and Purpose, OECD/NEA, Paris, France
- 5) NUMO (2004): Development of repository concepts for volunteer siting environments, Report NUMO-TR-04-03, NUMO, Tokyo, Japan
- 6) NUMO (2007): The NUMO structured approach to HLW disposal in Japan. Report NUMO-TR-07-02, NUMO. Tokyo, Japan
- 7) Sorrell, S (2002): The Meaning of BATNEEC: Interpreting Excessive Costs in UK Industrial Pollution Regulation, J. Environmental Policy & Planning, 4, 23-40
- 8) Hideki Kawamura, Ian G. McKinley (2008): Integrated safety case development for deep geological repositories, International Conference Underground Disposal Unit Design & Emplacement Processes for a Deep Geological Repository
- 9) Hideki Kawamura, Ian G. McKinley, and Fiona B. Neall (2008): Practical and safe implementation of disposal with prefabricated EBS modules, International Conference Underground Disposal Unit Design & Emplacement Processes for a Deep Geological Repository
- 10) Hideki Kawamura, Ian G. McKinley, Satohito Toguri, Hidekazu Asano (2008): Quantifying the performance of various EBS emplacement methods, IHLRWM 2008, Las Vegas, NV, Sep 8-12

第4章 セーフティケースへのアプローチ

本章では、前章での統合化したセーフティケースからの要件設定の研究と平行し、処分の安全性を示すために試みた様々な研究成果を、セーフティケースへの工学、科学、社会・倫理的な観点からのアプローチとして整理する。それぞれの研究は、図 4-1 に示す放射性廃棄物処分の特徴である相互領域の重なりを考慮し、意思決定に参画するステークホルダーを意識して実施した。

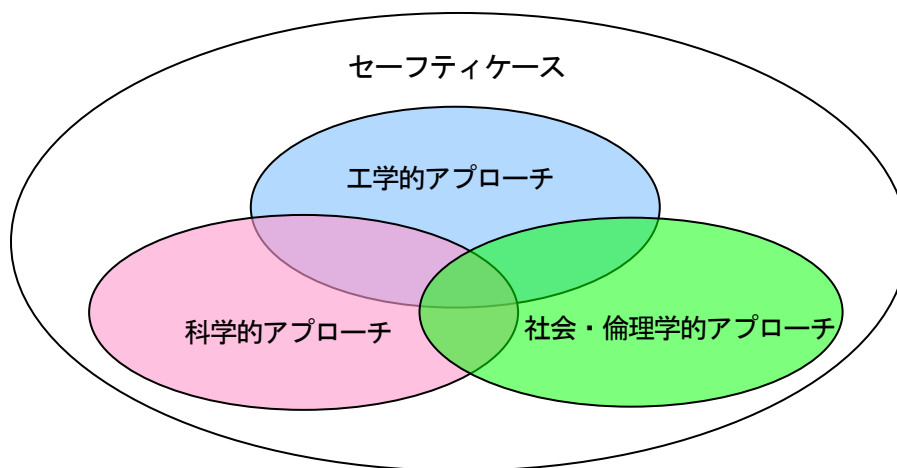


図 4-1 工学・科学・社会・倫理学アプローチとセーフティケースの関係

4.1 工学的アプローチ

工学的アプローチによる課題解決の事例研究として、本節では、2つの研究成果を取りまとめて記述する。

米国の DOE（エネルギー省）の管轄下にあるアイダホ国立環境工学研究所（Idaho National Environmental and Engineering Laboratory: INEEL）との共同研究で実施した放射性廃棄物の閉じ込め技術（多機能工学バリアシステム）の開発、および原子力発電環境整備機構（原環機構）からの受託研究として海外の専門家と共同で実施した大規模空洞処分概念（CARE 概念）の開発である。

前者は、アイダホ州の砂漠に放置された毒性の高い放射性廃棄物から漏出した汚染物が、農耕や飲料水として利用されている重要な地下水源に浸透することを防ぐための対策を新しく考案し、その効果と実現性を実証した成果であり、後者は、高レベル放射性廃棄物処分概念のオプションの一つとして、長期中間貯蔵と処分を組み合わせ、パッシブな安全確保への移行に向けての処分

場閉鎖にいたる意思決定（将来世代の選択肢）に柔軟性を持たせることを意識した。ともに工学的な課題解決だけでなく、社会との接点を重要視したケースとして位置づけ、学術的な観点からの新しい概念を構築し、工学的な実現性を提示した研究である。

4.1.1 多機能工学バリアシステム：Smart Subsurface Barrier System

(1) 研究の背景

米国では、1950 年代から原子力エネルギーの利用が活発化し、関連する研究機関、特に DOE 所管の機関では、研究開発の進展に伴い多くの放射性廃棄物が発生した。筆者が共同で研究開発を進めた INEEL もその一つで、ドラム缶等の容器に封入した放射性廃棄物や毒性の高い化学物質が、アイダホ州内にある砂漠地帯にトレンチ掘削をして埋設された。（図 4.1.1-1 写真参照）



図 4.1.1-1 アイダホの砂漠に埋設される放射性廃棄物が入ったドラム缶他（INEEL より提供）

砂漠であるが年間 200mm 程度の降雨があるため、廃棄物内に浸透した雨水に放射性核種が溶け込み、地表面下 190m に広く分布する水源にまで汚染が拡大する恐れが発生した。アイダホ州の滞水層は米国内で最大であり、下流側では農耕や飲料水源として広範に利用されている。

米国では、上記のアイダホの放射性廃棄物処分場だけでなく、全米に同様な処分場が 19 ヶ所存在し、またかつての鉱山事業から発生した重金属廃棄物が放置された地域が 50 ヶ所以上あり、いずれも地下水の汚染源として問題視されつつある。

このような汚染源を地下水源から隔離する方法について、INEEL からの要請を受け、筆者らと INEEL の研究者とで共同研究協定（CRADA: Cooperative Research and Development Agreement）を 2002 年に締結し、課題解決に向けて開発を進めた。

(2) 現地の状況

放射性物質や化学廃棄物が処分されたアイダホの砂漠地区の全景、および管理下におかれている処分場の図をそれぞれ、図 4.1.1-2、図 4.1.1-3 に示す。処分場全体はおよそ 10km²で今回の対象となるエリアは 40,000m²である。ドラム缶が埋設されたのは幅 20m、長さ約 100m のトレンチ構造で大小 58 のトレンチが存在する。トレンチは表層を構成する約 8m 厚さの砂層を掘削し、ドラム缶類を廃棄後、砂で埋め戻し、その上に低透水の粘土で覆土した簡単な構造となっている。砂層の下には広く溶岩塊を含む玄武岩質の層が分布し、帯水層は、地表から 190m 下に存在する。



図 4.1.1-2 写真 アイダホ砂漠における処分場の全景

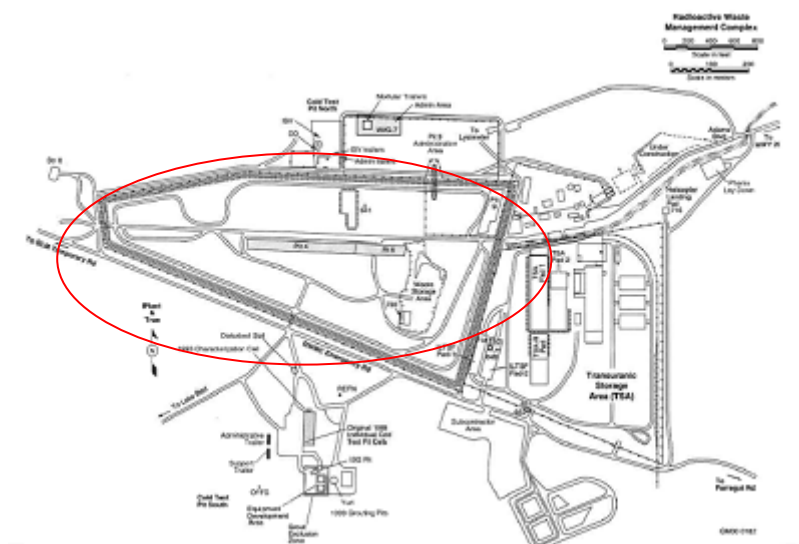


図 4.1.1-3 処分場の平面図と研究の対象地域（円内）

(3) 研究開発の目標

アイダホ州は、放射性廃棄物に限定しない地下水の汚染防止に関する法律として、汚染物質を

隔離する場合の環境要件を1995年に規定している。主要な目的は地下水源の汚染の防止であり、防止方策を実施するについては、事前に州の確認を受けることを要求している。1997年、筆者とINEEL 担当者との汚染防止策に関する協議により、放射性物質が埋設されているトレンチ側部および下部に、人工的な低透水バリア構築を研究開発のターゲットとすることで共同研究協定を提携した (CLADA, 2000)。対象サイトでの調査結果や、事前の核種移行解析結果等から設定した開発目標は以下の4点である (河村他、2004)。

- ① 構築したバリアの性能が確実に確認できること
- ② バリアとしての閉じ込め性能は100年以上有効であること
- ③ 目標とする閉じ込め性はシステム全体で 10^{-9}m/sec 以下の透水性とすること
- ④ 他の方策と比較して低コストで構築できること

最初の3つの目標は、アイダホ州の要件から直接設定し、コストについては、事業としての成り立ち性を考慮して設定した項目である。

(4) 開発目標への対応策

4項目の開発目標 (要件) から、それぞれの以下の開発項目と確認事項を設定した。

- ① バリア性能が確実に確認できること：米国におけるこの要件の解釈では、構築する閉じ込めバリアは目視等での直接的な検査を合格することを求めており、そのために、研究の初期段階で、地中へのグラウトによるバリア構築は断念した。構築したバリアを直接的に検査するためには、バリアへのアクセスを確保する必要がある。
- ② 100年以上の性能が有効であること：性能担保は、バリア材料の品質と構造の健全性、あるいは100年以上にわたる維持管理のシステムの準備を要求している。材料の選定については、次の目標とも密接に関係するが、選択した材料やバリアの構造が100年以上にわたり健全性を担保するために、地下環境および砂漠での不飽和条件を考慮した材料の劣化や変質のプロセスに関する評価方法の確立が必要となる。
- ③ 10^{-9}m/sec の透水性を確保すること：本目標に対しては、バリアの構造とバリア材の選定で担保することとする。さらに、上記の目標とも関連し、長期的変質や劣化に関する知見の準備も必要となる。
- ④ 低コストで構築できること：開発するバリアのコスト・パフォーマンスを評価する指標として、本研究ではバリア構築以外の対策方法を準備する。標準的な方策として、要求されている同等のバリアを構築した他施設に廃棄物を移動する案を準備した。この場合、新規の処分

(5) 研究開発の手順

研究開発を実施するにあたり、開発のゴールを実証試験によるシステムと性能の確認におき、
図 4.1.1-4 に示す手順で実施することとした。

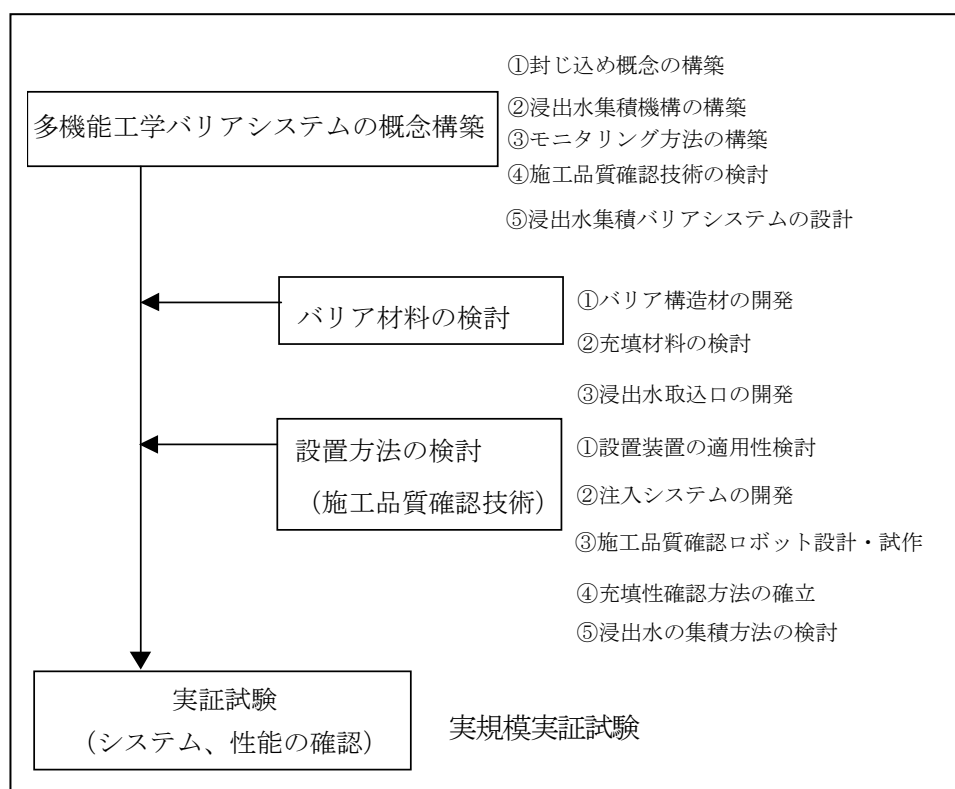


図 4.1.1-4 多機能工学バリアシステム開発の手順

(6) 研究開発の体制とスケジュール

研究開発は、まず、日米共同で開発目標に合致するバリア概念の構築し、その後日本側が中心に概略設計を実施した。要素開発としては、日本側では工学的な観点から、詳細なバリア材料の選定を含む設計および室内試験、地下での玄武岩層を対象としたバリア構築方法の開発に着手した。また、INEEL では、現地の玄武岩の特性を調査し、構築方法に用いる機器類の性能を比較検討し、機器選定での要件を設定するとともに、バリア性能の検査確認方法の開発を分担した。

共同研究期間は 2002 年の CLADA 締結から 2005 年までの 4 年間で実施した。

(7) 研究開発成果

(i) 多機能工学バリアシステムの概念の考案

地下に構築するバリア概念は、図 4.1.1-5 に示す汚染地域の地中に放射性物質を閉じ込めることを基本に、前述した開発目標の達成と現状技術での実現性を考慮した結果として、ジョイントにより結合した鋼管パイプ群による連続構造物を地中に建設する概念を考案した。



図 4.1.1-5 多機能工学バリアシステムの概念 (Kawamura et al. 2004)

鋼管パイプそのものは、高い止水性を有するが、ジョイント部の特性を考慮し、工学バリアとして次の2タイプの機能を設定した。

- ① 不透水性バリア : 汚染物質を確実に封じ込めることを目的とし、要求される止水性能を確保する。
- ② 浸出水集積バリア : 工学バリアを構成する鋼管パイプ上部に孔を開けて、汚染水を集積、排出することにより除染を加速する。環境回復が急がれる場合に適用する。

本研究ではこれらの多機能を有する工学バリアを「多機能工学バリアシステム」と命名した。

(ii) 鋼管パイプの継ぎ手部の開発

鋼管パイプを連続させるために、様々な継ぎ手構造を比較検討し、施工方法、継ぎ手部の止水

性能の検査方法、コストを比較指標として、図 4.1.1-6 に示す継ぎ手を実証試験の対象とすることとし、詳細な設計を実施した。継ぎ手部の止水性を担保するために、継ぎ手構造の空洞（図中灰色部分）に低透水材料を充填する。

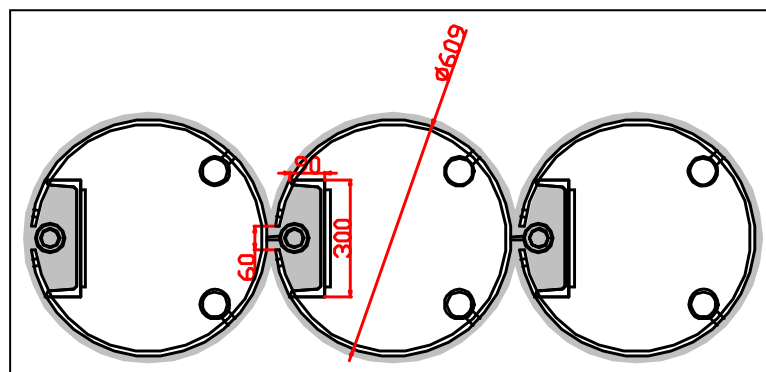


図 4.1.1-6 鋼管パイプの継ぎ手部の概念設計

(iii) 充填材の開発

継ぎ手部の充填材に関しては、止水性を確保するために継ぎ手部および鋼管外周部に確実に充填される充填材を調査し、適用性を確認した。対象とした材料は、セメント、ポリマー材、ベントナイト、ベントナイト・セメント混合材料である。これらの材料について、室内試験による材料分離、固化時の収縮、亀裂発生、可塑性、透水係数の測定、および充填性の予備試験を実施した（西田他、2004）。図 4.1.1-7,8 に予備試験時の状況を示す。実規模の継ぎ手を作成し、セメント・ベントナイト混合材料をダブルパッカー方式で充填した試験体を用いて、注水試験を実施した結果、システムとしての透水性は、 10^{-10}m/sec のオーダーを実現でき、開発目標とした 10^{-9}m/sec を達成できる見通しを得ることができた（西田他、2005）。

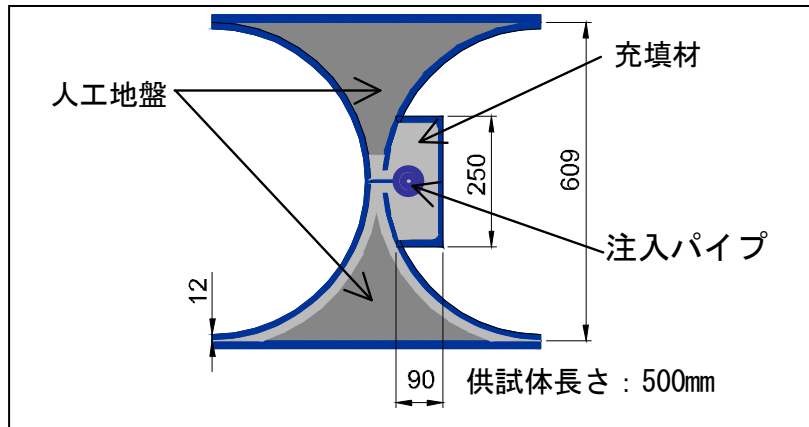


図 4.1.1-7 継ぎ手部の充填予備試験の概要（断面図）



継ぎ手部の構造と充填後の断面

図 4.1.1-8 実規模継ぎ手部への充填予備試験

(iv) 工学バリア設置方法の開発

多機能工学バリアの建設方法について、現状での適用可能な工法を調査・整理した結果、小口径管推進機により地中に鋼管パイプを連続して設置し、継ぎ手により連結する工法を採用した。小口径管推進機については、INEEL における溶岩塊を含む玄武岩への適用性を考慮し、硬岩掘削用の全断面切削機を選択した。切削機のパフォーマンスについては、米国コロラド鉱山大学で対象となる玄武岩を用いた性能確認予備試験を実施した。玄武岩は健岩部と、割れ目が多く間隙がある部分とでは強度に大きな差がある。密度の高い層では、一軸圧縮強度は 53.2 MPa から 63 MPa の範囲であり、間隙の大きい層では 4.0 MPa から 4.2 MPa の強度である。掘削機の推進圧の制御により、強度差のある玄武岩を掘削できるカッターの組み合わせを確認することができた。

(v) 多機能工学バリアシステム性能検査方法の確立

多機能バリアシステム設置後の性能確認方法として、直接的に透水係数を計測することは困難となるため、鋼管パイプの連続性と継ぎ手構造での充填性を直接測定する手法を共同で開発した。鋼管の中を計測することになるため、計測機器は自走式のロボットに装着し、遠隔制御による計測システムとした。計測する項目は、継ぎ手内の空隙と充填密度を対象とし、RI を用いた方法および超音波を用いた方法を採用した。観測結果は、事前に求めた空隙や密度と透水係数の試験結果でキャリブレーションを実施した。

(8) 実規模実証試験

開発の最終段階において、予備試験等を通じて確立してきた多機能工学バリアシステムの各要素技術を統合した実規模の実証試験を実施した（図 4.1.1-9）。実証試験は、小口径推進掘削機による連続した鋼管パイプの構築試験（図 4.1.1-10）、継ぎ手部の充填試験（図 4.1.1-11）、充填部の遠隔操作による性能確認試験（図 4.1.1-12）を実施したのち、図 4.1.1-13 に示す全体系での注水試験、および解体時にワイヤソーによる施工断面の取り出しサンプルを用いた継ぎ手部の透水試験を実施した。

小口径推進掘削機（マイクロ TBM）は、セメント系材料で構築した人工バリア岩盤（圧縮強度 20MPa）を問題なく掘削でき、掘削にともに押し込んだジョイント付鋼管パイプ（φ 600mm、厚さ 12mm）も円滑にセットできた。ジョイント分の充填は、セメント・ベントナイト混合剤をジョイント内に事前に設置した注入パイプを利用して実施した。これらの一連の施工確認試験は、掘削速度、充填速度とも計画通り実施できた。

ジョイント部の止水性を確認するために、予備試験で用いた RI 法（日本）と超音波法（INEEL）による充填部の密度と空隙を非破壊で検査した。透水係数へのキャリブレーションは、予備試験でのデータを用い、ジョイント部全体での透水係数のばらつきを含めた解析を実施した。非破壊測定後の全体系での透水試験、および切り出したジョイント部の透水試験結果は、いずれも 10^{-9}m/sec 以下であり、目標性能の達成が確認できた。



図 4.1.1-9 実規模実証試験の全景（2003 年に実施）



図 4.1.1-10 小口径推進掘削機（左写真：推進機、右写真：全断面掘削機）



図 4.1.1-11 継ぎ手部へのセメント・ベントナイト混合材料の充填状況



図 4.1.1-12 継ぎ手部の遠隔での密度測定状況

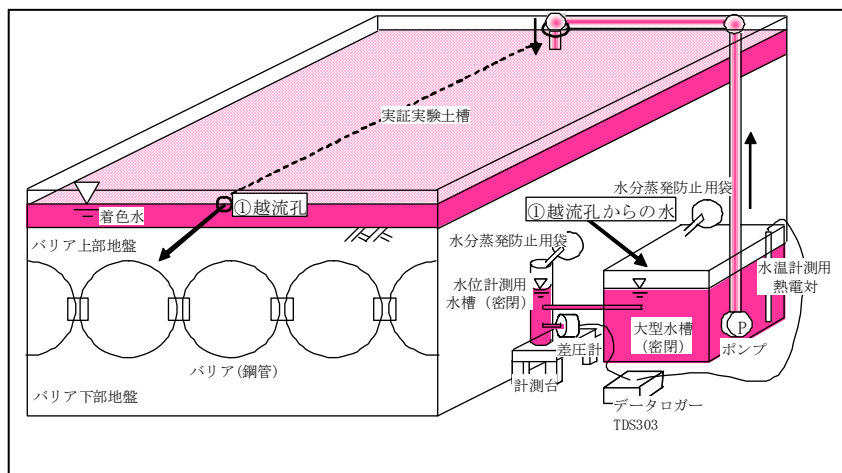


図 4.1.1-13 全体システムを対象とした注水試験の概要

(9) まとめと今後の展開

砂漠に埋設された放射性廃棄物を含む汚染水の地下水源への浸透を防ぐために、米国 INEEL との共同研究として実施した多機能工学バリアシステム開発は、実規模実証試験による実現性と性能の確認を実施することで、ステークホルダーである州の要件を満足できるバリアの性能目標を達成できた。セーフティケースへの工学的なアプローチとして実施した本研究は、工学的な手段による放射性物質の確実な閉じ込めを主眼とし、手法確立のための実証試験や確認方法の開発を実施してきた。埋設された放射性廃棄物を取り出し、他の場所に移動した後、新たな隔離施設を建設することも現状技術で可能な選択肢であるが、そのためには、新たなサイトの選定と地域住民の受容れを必要とする。本研究での解決策は、廃棄物を動かさずに隔離する方法であり、社会的な受容性を含めて工学的に実現できる対応策を提示することができた。現在、アイダホ・サ

イトでの実証試験と適用試験のタイミングを図っている段階である。

尚、本研究成果は、日米での共同特許として日本では多機能工学バリアシステム、米国では Smart Subsurface Barrier System の名称で登録されている。

【参考文献】

- 1) Hideki Kawamura, John Richardson, Kevin Kostelnik, Shoko Sato, Reva Nickelson, Masaru Noda, Paul Sloan, Smart Subsurface Barrier for Environmental Containment, North American Society for Trenchless Technology, New Orleans, Louisiana, March 22-24 (2004)
- 2) Hideki Kawamura , Masaru Noda, Shoko Sato, Kevin Kostelnik, John Richardson, Reva Nickelson, Smart Subsurface Barrier, Waste Management '03 Conference, (2003)
- 3) Hideki Kawamura, Masaru Noda, Shoko Sato, Kevin Kostelnik, John Richardson, Reva Nickelson, Paul Sloan, Construction, Testing and Assessment of a Scaled Smart Subsurface Barrier in Japan, Waste Management '04, (2004)
- 4) 西田憲司、須藤賢、上野孝之、佐藤晶子、納多勝、河村秀紀（2002）：不透水性バリアの性能評価、第 37 回地盤工学研究発表会講演集、pp.1233～1234
- 5) 西田憲司、須藤賢、上野孝之、佐藤晶子、納多勝、河村秀紀（2002）：不透水性工学バリアの性能評価(第二報)、第 57 回土木学会年次学術講演会講演集、第Ⅶ部門、pp.279～280
- 6) 納多勝、佐藤晶子、河村秀紀、西田憲司、須藤賢、上野孝之（2003）：不透水性工学バリアの性能評価(第三報)、第 58 回土木学会年次学術講演会講演集、第Ⅶ部門、pp.283～284
- 7) 佐藤晶子、納多勝、河村秀紀、西田憲司、須藤賢、上野孝之（2003）：不透水性工学バリアの性能評価(第四報)、第 58 回土木学会年次学術講演会講演集、第Ⅶ部門、pp.285～286

4.1.2 大規模空洞処分概念研究：CARE

本節では、セーフティケースの工学的なアプローチとして、処分場概念オプションについて研究した成果を取りまとめる。処分場概念オプションの構築は、多様な地質環境への対応を考慮した工学的な検討により、実現性と安全性をより確実なものとし、また、将来世代の選択の範囲を広げる意味で、社会との接点を重要視するセーフティケースの構築に密接に関連する研究である。

(1) 研究の背景

処分場概念オプションについては、原環機構の技術報告書（NUMO TR-04-01, 2004）に様々な形態が提示されている（図 4.2-1 参照）。わが国における高レベル放射性廃棄物処分場の概念は、第2次取りまとめに代表されるように、ガラス固化体を処分孔に縦置き定置、あるいは処分坑道に横置き定置するもので、これらは 1980 年代に提示された諸外国の概念に大きな影響を受けている。例えば、スイス Nagra が Project Gewähr に示した横置き概念やスウェーデン SKB が KBS-3 で示した縦置き概念である。当時の両国の処分場の特徴は、広く均質な母岩を対象とした平面配置（図 4.1.2-1 の左欄参照）にあり、わが国でのサイトが特定されていない研究段階での処分概念も同様な配置を標準オプションとして採用した。

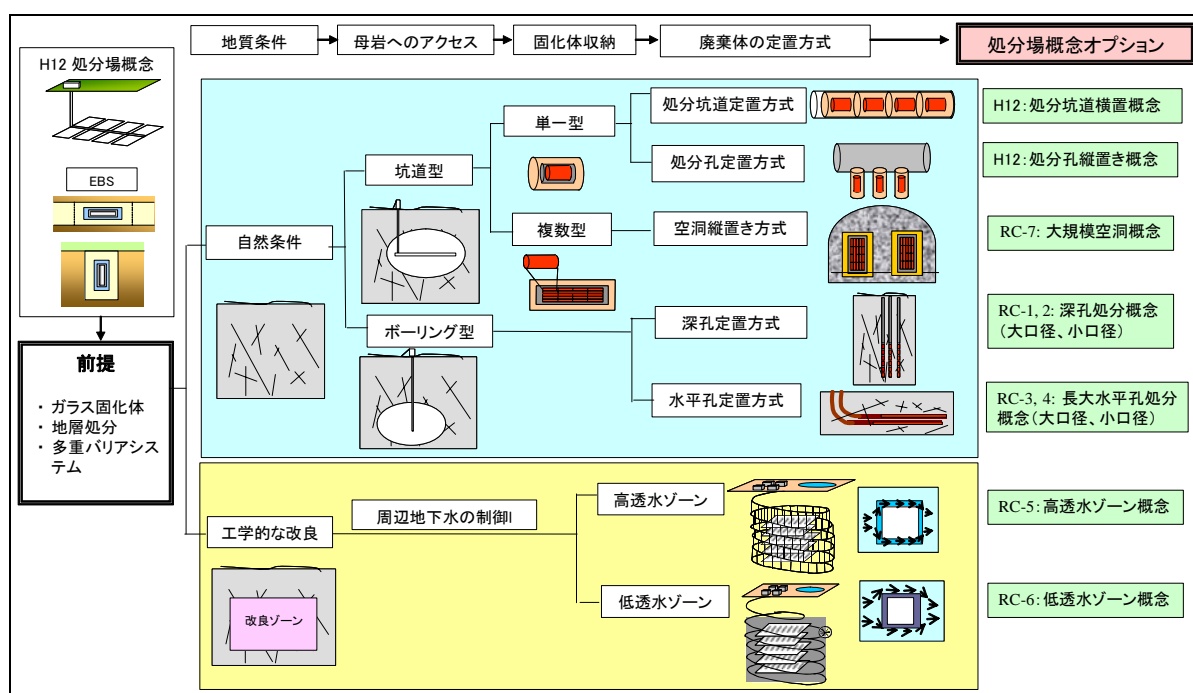


図 4.1.2-1 処分場概念オプション設定の流れ（原環機構、2004）

図 4.1.2-1 における処分場概念オプションの研究では、多様な地質環境を考慮し、科学的なアプローチで処分概念を構築することを目標に、判断指標を設定し、これまでの処分場概念も包括する手法を考案してきた。長期の安全性確保に関しては、多重バリアシステムを基本とし、ベントナイト緩衝材と鋼製オーバーパックからなる人工バリアシステムを標準とする。意思決定の判断指標は、地質条件、母岩へのアクセス、ガラス固化体の収納状態、廃棄体の定置方式での分岐を考慮したロジックツリーの形状を設定した。その結果、最終的な処分場概念オプションとして、第2次取りまとめで提示された処分坑道横置き概念、処分孔縦置き概念の他に、大規模空洞処分概念、深孔処分概念、長大水平孔処分概念、高透水ゾーン概念、低透水ゾーン概念が設定された。それぞれの処分概念オプションは、多段配置や分散配置といったバリエーションを有する。

本節で扱うセーフティケースへの工学的なアプローチの研究対象として、多数の処分場概念オプションから、現状技術に基づく実現可能性をベースに、実施主体の処分事業への柔軟性と将来世代の選択の幅を確保する概念として「大規模空洞処分概念」を選定した。

(2) 大規模空洞処分概念の特徴

大規模空洞処分概念は、20本のガラス固化体を1本の鋼製の大型容器（キャスタ）に収納し、地下の処分空洞に定置する概念である。4万本のガラス固化体であれば、2000本のキャスタを定置することになる。この概念において、処分場の規模は、空洞の安定性と空洞へのキャスタの埋設密度により決定される。埋設密度は、キャスタから発生する熱によるベントナイトの温度に依存する。第2次取りまとめでは、ガラス固化体からの発熱によるベントナイトの熱変質を考慮して100℃を上限となるように、オーバーパックの埋設密度を決定している。大規模空洞処分概念では、20本のガラス固化体からの熱発生が低減するまで、キャスタ周辺へのベントナイトの設置を遅らせる必要があるため、キャスタを地下空洞に数100年貯蔵した後ベントナイトを設置する概念となる。結果として数100年後、ベントナイトを設置し処分場を埋戻すまでの期間、廃棄物への接触が可能となり、将来世代の意思決定に選択肢を与えることができる。

また、キャスタを用いることで、処分場の操業がより簡略化され、1日5本のオーバーパックを埋設する事業計画が、4日に1本のキャスタの設置となり、操業プロセスが大幅に合理化されるため、事業としてのメリットも大きくなると想定される。

従来の処分場概念では、廃棄物を地下に埋設した場合、速やかに埋め戻し閉鎖することで、パッシブな状態にすることを基本としている。比較して、埋戻し・閉鎖までの期間を必然的に長く取れることは、将来世代が廃棄物の再利用を望んだ場合、容易に対応が可能となる。各国で選択

されている使用済み燃料を再処理せず直接処分する概念の場合、将来において使用済み燃料を再利用資源として見直す可能性を残すことができることでエネルギー政策的にも重要な特徴を持つ概念となることがわかる。

(3) 大規模空洞処分場の概略設計

大規模空洞処分概念の具体的な仕様を明示するために、以下の項目について定量的な考察を実施した。

- ・ 空洞の力学的安定性解析：空洞の仕様と空洞間の距離の設定
- ・ 熱解析：ベントナイトの温度を考慮したキャスタの埋設密度の設定
- ・ レイアウト設計：上記の解析結果による処分空洞のレイアウトを設定

対象とする岩盤の特性は第2次取りまとめで提示された硬岩（花崗岩：一軸圧縮強度 115MPa）と軟岩（泥岩：一軸圧縮強度 15MPa）とし、処分場の深さをそれぞれ 1000m、500m に設定した。上記の設計検討のうち、硬岩の場合の結果を図 4.1.2-2 にまとめて示す。硬岩での空洞の大きさは、17m×18m とし、離間距離を 2D 以上確保することとして 36m とした。ベントナイトへ与える影響を考慮した解析では、キャスタの状態で約 300 年間貯蔵した後ベントナイトを設置することを仮定し、ベントナイトの最高温度を 100℃以下とする埋設密度として、坑道断面に 4 本のキャスタを 6m ピッチで配置する概念を設計した。これらの解析結果をベースに処分空洞のレイアウトを検討した結果、長さ 800m の大規模空洞を 4 本準備することで 4 万本のガラス固化体を処分できることが分かった。図 4.1.2-3 には、アクセス坑道などその他の施設を考慮して設計した処分場全体の概念を示す。

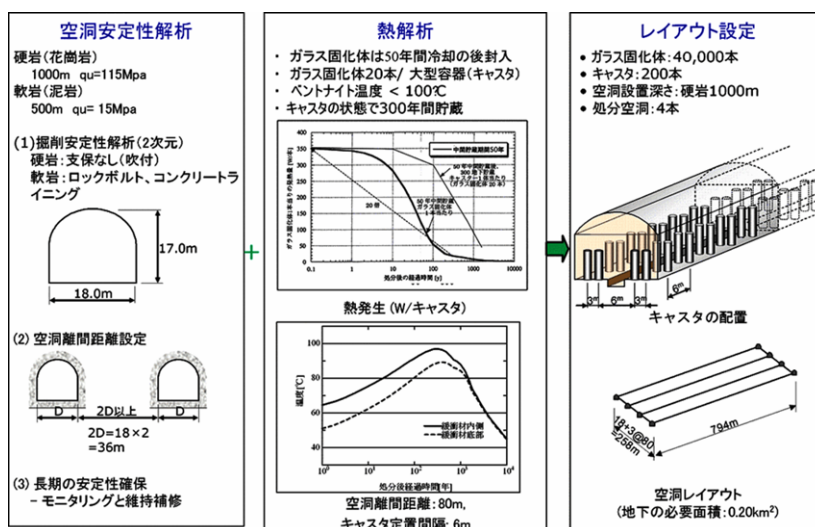


図 4.1.2-2 大規模空洞処分概念の設計解析結果

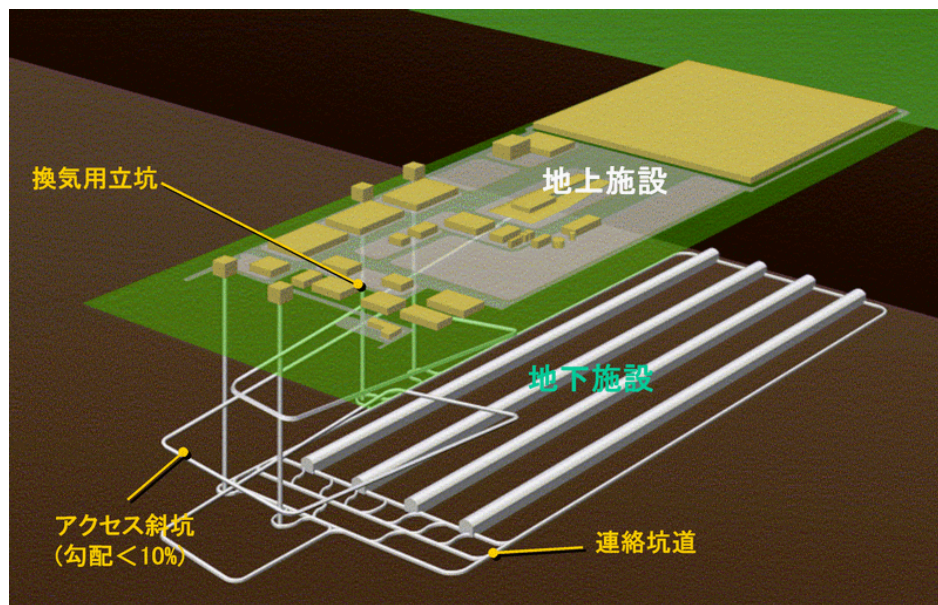


図 4.1.2-3 大規模空洞処分場全体のレイアウト（原環機構 TR-04-02, 2004）

(4) 人工バリアシステムの概念

大規模空洞処分概念の長期の安全確保の考え方は、第2次取りまとめと同様な多重バリアシステムであり、基本的にキャスタとベントナイト緩衝材からなる構成は同じである。キャスタは、ガラス固化体を20体収納する大きさとし、輸送・長期貯蔵の容器を兼ねる性能を有するとした。キャスタの仕様は、ドイツの処分概念における類似の容器（CASTOR）を参照し、輸送・貯蔵中の遮蔽を考慮して、厚さを約25cmと設定した（Masuda, et al., 2006）。図 4.1.3-4 にキャスタの仕様を示す。キャスタ内の空間には、長期の安定性と親和性を考慮してガラス固化体と同じ成分のガラス・ビーズの充填を想定している。

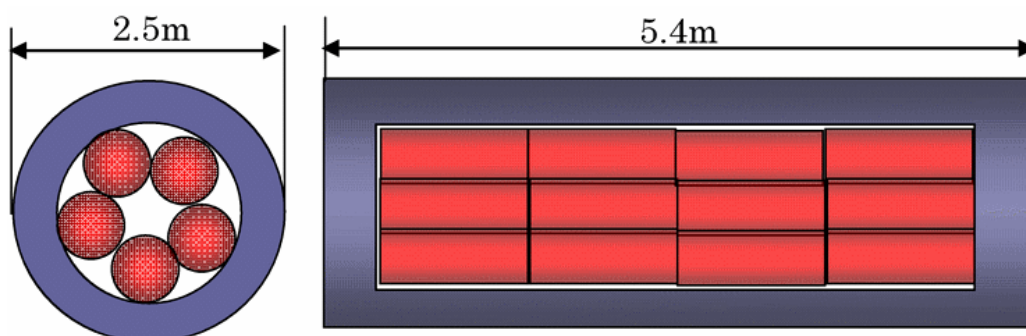


図 4.1.2-4 キャスタの概要（Masuda et al, 2006）

キャストを地下空洞に貯蔵している期間中は、図 4.1.2-5 に示すように空間を残し、ガラス固化体の発熱による温度上昇を防ぐために強制換気の設備を設置する。換気設備は入気と排気の独立した経路を設計する。このような状態で 300 年間貯蔵する。

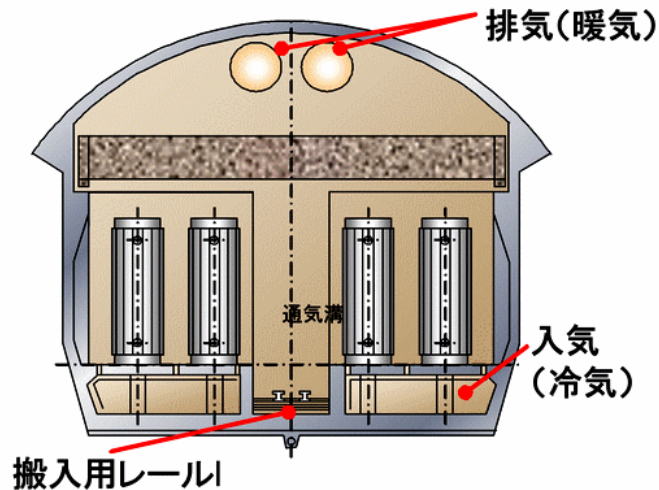


図 4.1.2-5 貯蔵空洞の概要 (Kawamura et al, 2006)

300 年間の貯蔵期間が終了した後に、キャスト周辺にベントナイト緩衝材を設置することを計画する。ベントナイトの設置に関しては、様々な方法を検討した (Kawamura et al, 2006)。例えば、図 4.1.2-6 に示すようなベントナイトブロックをキャスト周辺に遠隔で設置していく方法、あるいは、ペレット状ベントナイトを充填する方法である。また、キャストを別の坑道に移動し、そこでベントナイトと一体化し、再定置したのちに周辺を充填する方法も考案した。

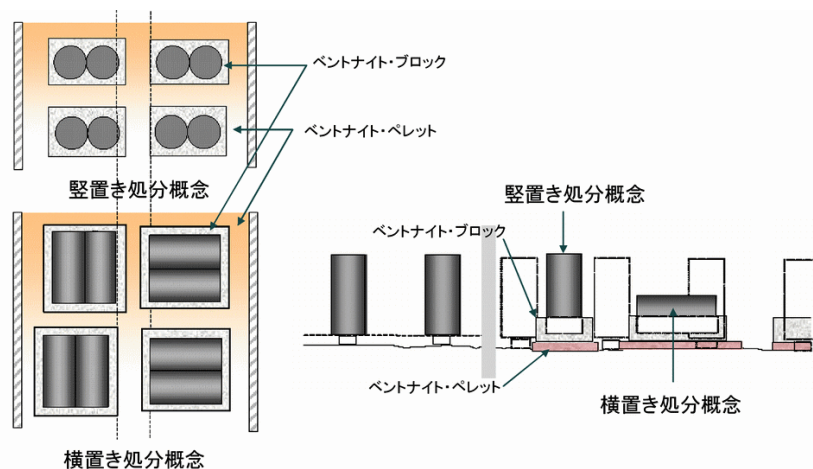


図 4.1.2-6 キャスタ周辺のベントナイト設置方法 (Kawamura et al, 2006)

(5) 長期貯蔵中の安定と安全性

新たに考案した本概念では、キャスタを 300 年間地下空洞に貯蔵することを基本としている。このため、貯蔵期間中の安全性と安定性について、以下に示す考慮すべき事項が発生する。

- ・ 地下空洞の安定性
- ・ 長蔵空間の健全性
- ・ キャスタの健全性
- ・ 核物質に対するセキュリティ
- ・ 再取り出し性を考慮した設備の健全性

(i) 地下空洞の安定性

本案で設定した地下に建設する地表面下 1,000m で約 300m² の断面積の空洞は、図 4.1.2-7 に示す地下発電所のタービン空洞建設等、既存の建設技術を踏襲するものとする、長期の安定性を確保するためにはコンクリートによる補強や支保工の設置が必要となる。設計段階での岩盤応力や想定地震力に対する耐力設計からこれらの補強工の仕様は標準的な考え方で設定できる。特に留意すべき事項は、空洞の耐用年数が 300 年以上に及ぶため、補強工の経年劣化、および周辺岩盤の変質の影響を評価しなければならない点である。多くのセメント材料は、空気中の二酸化炭素や地下水に含まれるカルシウムや塩素などの物質に影響を受け中性化する。コンクリートが中性化していくことで、設計時の初期強度や変形性能の低下を招く可能性がある。また鉄筋を補強材として用いる場合は、コンクリートの中性化や亀裂からの地下水浸透により、腐食が促進され、空気中の微生物の活動で、ガスを発生するとともに体積膨張によりコンクリート支保工としての強度特性を喪失する可能性が高くなる。

長期の空洞安定性を期待する場合、材料の劣化変質を考慮に入れた材料選定や設計の方法を確立すること、また、定期的な維持補修の方策を準備しておくことが必要となる。



図 4.1.2-7 揚水式地下発電所建設状況（大河内発電所建設時、1990 年）

(ii) 貯蔵空間の健全性

放射性廃棄物の長期貯蔵空間として求められることは、空間の安定性ととともに、貯蔵環境の安定した維持管理である。その中であって換気設備と排水設備については、非常用電源のバックアップを含め、多重の安全防護が必要となる。特に地下空洞の安定性確保のために大量に使用されているセメント材料からのアルカリ性浸出液による各設備への影響、微生物活動による腐食の加速化など、設備機器の劣化に影響を及ぼす因子への対応策と維持補修の仕組みを確立しておく必要がある。

キャスタに収納されたガラス固化体の発熱のため、処分場は 300 年間にわたり強制的な換気が必要となり、同時に還元雰囲気であった地下空間に大量の酸素と二酸化炭素が持ち込まれる。また、地下空間に高湿度で恒温の環境が維持されるため、微生物の活動が活発になると想定される。空洞の長期の健全性と長期評価への影響について、地化学的なアプローチで予備的評価を試みた (West, et al, 2005)。以下にその研究成果の要点を取りまとめる。

- ・ 空洞を支えるコンクリート製支保は、岩盤からの地下水の浸透と空洞内の換気によりコンクリート中が不飽和状態となるため、微生物活動を含む地化学的な反応が、活発に進展する。特に、岩盤中のパイライト酸化により硫酸根(SO_4)が形成され、間隙水が酸性になると共に発熱する。これらの現象が不飽和のコンクリートに影響を与え、強度特性の低下を招く可能性がある。

- ・ 微生物活動によりキャスタ周辺は、メタンガスや炭酸ガスとの親和な環境が構築される。また将来的に放射性核種がキャスタから放出された場合、残存する微生物により長期にわたり酸化雰囲気が続く可能性があるため、安全評価での条件設定上留意しておく必要がある。

これらの指摘は、これまでの知見から考察されたもので、今後本概念の実現に当たっては、評価するモデルの開発をふくめた研究が必要とされる。

(iii) セキュリティ

前述したように、長期貯蔵処分は、処分の合理化をはかるだけでなく、将来世代の選択の幅を広げることを目標としている。特に、使用済み燃料の直接処分における貯蔵期間の維持は、使用済み燃料を再利用する機会を増やす大きな意味を持つ。一方、長期貯蔵による安全性、特に使用済み燃料は、プルトニウムの原料となることから、国際的に保管に対して IAEA による核拡散防止措置等の強い管理が求められている。そのため、地下施設での 300 年間の長期貯蔵についても、制度的な管理を含めて特別な配慮が必要となる。例えば、地下空洞にアクセスし、定期的な査察が可能な環境を整えることが求められる。基本的に大型容器の搬入・定置は遠隔操作による作業を想定するため、通常時は、作業員が定置環境に直接アクセスすることはない。

300 年間の制度的な管理の実現性について、共同考案者と本概念を海外に紹介したときに、われわれは日本の神社・仏閣における 1,000 年以上に及ぶ管理システムを説明に用いた。2004 年に本概念が *Nuclear Engineering* で取り上げられたときに、CAvern REtrievable から”CARE”と名づけた。図 4.1.2-8 の写真に CARE が取り上げられた *Nuclear Engineering* の雑誌の表紙を示す。木造構築物である法隆寺が 1,000 年以上にわたり確実に管理されてきた事実を紹介することで、CARE での 300 年という期間は十分われわれの手で維持管理できるというエビデンスを示した。雑誌本文では、制度的管理の必然性を述べる根拠の中に、法律による仕組みのほか、文化と地域住民との支援の必要性についても言及した。CARE の概念は、処分に至るまでの安全性を保証するために、工学的な対応とともに社会的なバックアップの必要性も不可欠となることを示唆する例となっている。

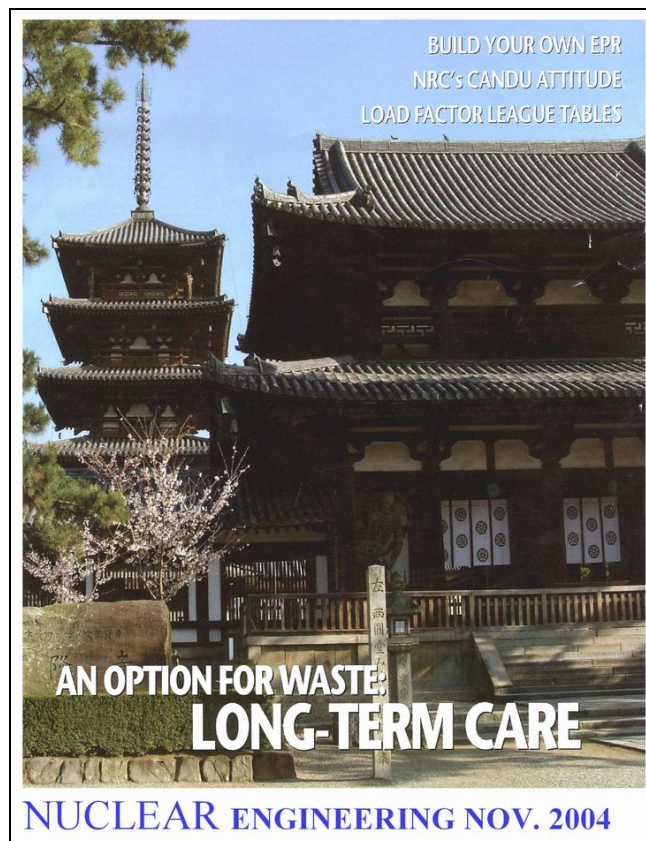


図 4.1.2-7 写真 Nuclear Engineering に紹介された時の雑誌の表紙（法隆寺）

(iv) 再取り出し性を考慮した設備の健全性

CARE 概念は、最終処分に至る 300 年間までの、再取り出し性を随時確保する概念である。そのため、キャスタの 300 年間にわたる健全性維持設計とともに、搬出するための設備についても考慮が必要となる。通常、搬入と定置の設備は、約 50 年間程度の操業期間を考慮して、設備の更新とともに維持管理の対策が講じられる。随時の取り出し性を確保するには、貯蔵環境の維持とともに、クレーン等取り出しに用いる設備の維持補修の仕組みを準備する必要がある。

(6) 長期の放射線学的な安全性

CARE 概念の長期安全性について、本研究では、図 4.1.2-8 に示す断面を対象とし、以下の前提で概略核種移行解析を実施した。

- ・ 安全概念は多重バリアシステムとし、そのうち人工バリアの安全機能を、キャスタによる 1,000 年間の核種の完全な閉じ込め、およびベントナイト緩衝材による核種移行遅延とする。
- ・ 地下空洞に流入する地下水は、空洞断面に直行して流動するとし、キャスタの断面に対して

の地下水流入量は全て同じとする。

- キャスタに格納されるガラス固化体は 20 本とし、等価な断面積をもつ固化体として溶出率を算定する。
- キャスタから溶出した核種は、ベントナイト緩衝材を拡散で移行し、その厚さが薄くなる空洞の底盤から全て放出されると仮定する。実際は、時間の遅れを伴い空洞全体から天然バリアに放出されるが、本評価では、保守的に考え、天然バリアへの放出距離が短い底盤を代表断面とする。

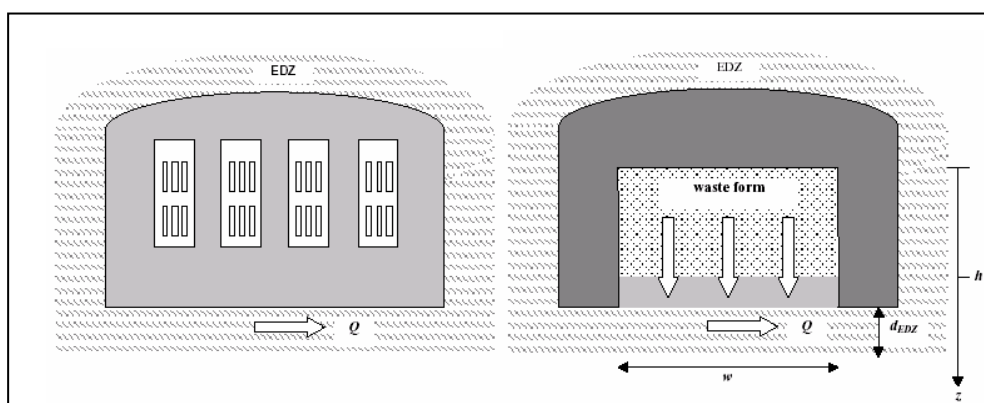


図 4.1.2-8 CARE 概念における天然バリアへの核種放出量算定モデルの概要

地下空洞から掘削影響領域（EDZ）に放出される核種の移行率について、同じ条件でのガラス固化体 20 本分の量と比較した結果を図 4.1.2-9 に示す。

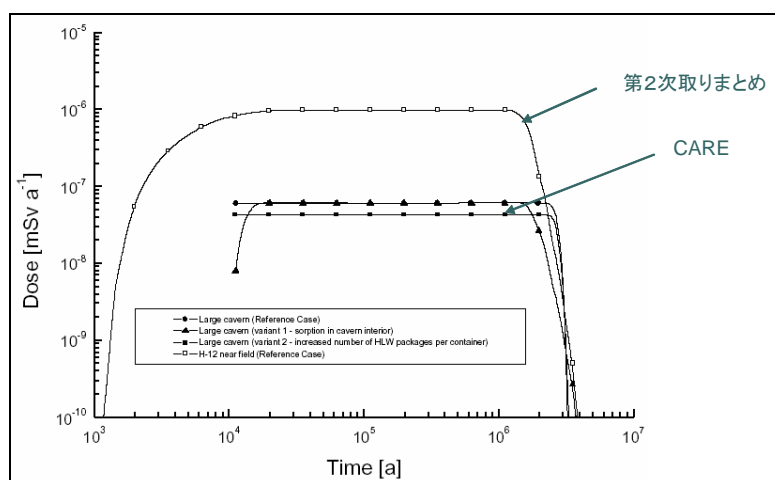


図 4.1.2-9 天然バリアへの核種放出量の比較（第2次取りまとめと CARE 概念）

第2次取りまとめと CARE 概念での天然バリアへの核種放出量を解析的に比較した結果として、CARE 概念は1 オーダの差で放出量が小さくなることが分かった。この原因としては、空洞の断面積に伴い、大規模な EDZ が形成されるために、ゼロ濃度の地点が第2次取りまとめのそれと比較して長く確保されること、また、大規模空洞周辺への地下水流流量の増加による希釈効果を期待できることが挙げられる。大型容器内のガラス固化体の状況をより厳密にモデルすることができれば、ガラス固化体 1 本当たりのフラックスを小さくすることができる可能性があり、より放出量は少なくなる。

(7) 第2次取りまとめ処分場概念とCARE概念の数量比較

CARE 概念を考案する過程で、第2次取りまとめの標準ケースとなった処分孔竖置き概念と、CARE 概念との地下施設の必要面積、掘削量、ベントナイト緩衝材量、および埋め戻し量の数量比較を実施した結果を図 4.1.2-10 に示す。

両処分場概念での大きな差は、地下施設の必要面積である。20 本のガラス固化体を 1 本のキャスタに格納することで、300 年間の貯蔵期間が必要となるが、処分場としての地下施設の必要面積を約 1/10 に大幅に縮小できる。したがって、処分場の立地において、母岩としての必要体積を大きく削減できる。また、CARE 概念の場合、鋼製の容器の材料量、および搬送や地表施設での搬送容器から個別のオーバーパックへの詰め替えや溶接作業が大幅に削減できる。そのため、これらの作業に付随する作業安全や品質確保の確度も向上する。

一方、300 年間の地下環境の維持（換気、排水、空洞安定性など）、再利用を考慮した設備の維持管理、および 300 年後のベントナイト設置や埋め戻しのための技術と費用の確保などの定量的な算定は未実施である。

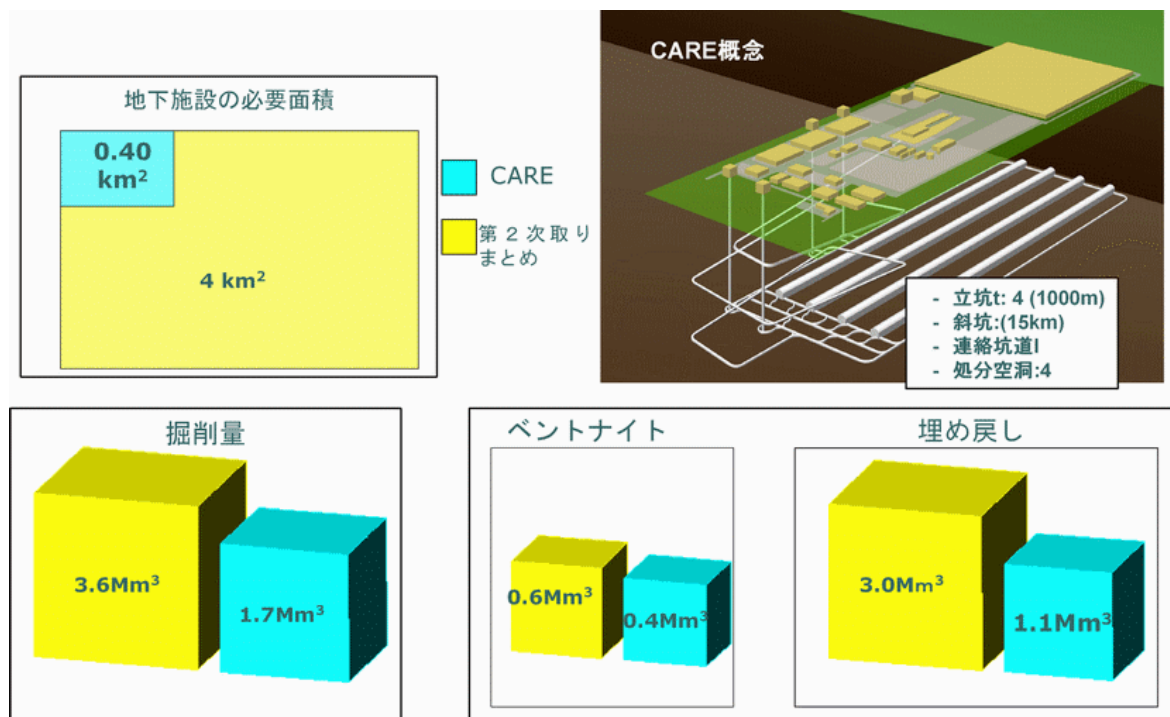


図 4.1.2-10 第2次取りまとめ概念と CARE 概念の数量比較

(8) まとめとCARE 概念の展開

セーフティケースの工学的なアプローチとして大規模空洞処分場概念(本研究では CARE 概念と呼ぶ)に関する研究成果を取りまとめた。CARE 概念については、これまで国際会議や論文で広く紹介し、長期の安全性と社会的な要求の接点を実現化する有効な概念として評価を受けつつある。放射性廃棄物は、その高い毒性から、できるだけ速やかに人間環境から隔離することを基本としているが、特に使用済み燃料は将来的に資源として再利用できる価値を有している。将来世代の選択肢を確保するためにも、現世代で工学的に実現できる概念も考慮しておくことは処分全体のセーフティケースのためにも有用な行為であり、その実現性を学術的な角度で考察した本研究成果は、国際社会で高く評価されている。例えば、英国、カナダ、米国での処分オプションの実現性の概念の一つとして CARE が取り上げられている。

従来のガラス固化体を 1 本ずつ処分する第2次取りまとめでの概念を基本系とした場合、20 本以上のガラス固化体を大型容器に格納し、処分する CARE 概念は処分オプションの最右翼にあり、セーフティケースへの工学的なアプローチの最適解は、その間にあると想定できる。

【参考文献】

- 1) 原子力発電環境整備機構(2004)：高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性、NUMO TR-04-01
- 2) JNC (2000) :H12 Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan, Project Overview Report, TN1410 2000-001
- 3) Masuda, S., Umeki, H., McKinley, I.G., Kawamura, H.(2004), Management with CARE, Nuclear Engineering International, 49 (604), 26-29.
- 4) McKinley, I.G., Neall, F., Smith, P.A., West, J.M., Kawamura, H.(2004), Evolution of the Cavern Extended Storage (CES) concept for flexible management of HLW, Science Basis Nuclear Waste Management , XXVII, 931-936.
- 5) McKinley, I.G., Neall, F.B., Kawamura, H., Umeki, H. (2006), Geochemical optimization of a disposal system for high-level radioactive waste, J. Geochemical Exploration.
- 6) West, J.M., McKinley, I.G., Neall, F.B., Rochelle, C.A., Bateman, K., Kawamura, H. (2006), Quantitative evaluation of the geochemical / microbiological processes within extended storage repositories, Science Basis Nuclear Waste Management (MRS), XXIX
- 7) Umeki, H., McKinley, I.G., Masuda, S., Kawamura, H. (2004), Alternative repository design options for HLW disposal in Japan. Proc. PSAM 7/ ESREL'04, 3552-3557
- 8) McKinley, I.G., Kawamura, H.(2005), CARE: a flexible repository concept for the 21st Century, Safety Barrier 3-4, 72-76 (English and Russian)

4.2 科学的アプローチ

セーフティケース構築への科学的アプローチが目指すものは、長期評価にかかわる信頼性の醸成（コンフィデンス・ビルディング）である。コンフィデンス・ビルディングは、放射性廃棄物処分のセーフティケースに対して、全てのステークホルダーが相互に確立すべきものである。そのためには、前章の工学的アプローチとともに、長期安全評価に導入される多くの専門家の判断とその根拠を分りやすく示すための手法が必要となる。本章では、以下に示す2例をステークホルダーへの説明性を高めるための科学的なアプローチとして取り上げた。

- ・ Geosynthesis を考慮した調査システムフローの研究
- ・ 地下水流動場の長期変遷予測に関する研究

4.2.1 Geosynthesisを考慮した調査システムフローの研究

(1) 研究の背景

Geosynthesis は、スイス Nagra が低中レベル処分場候補地である Wellenberg サイトを調査した結果を取りまとめた時に使った用語である。Nagra は、Wellenberg サイト調査の目的を以下に大別した（Nagra, 1998）。

- ・ 地質環境の把握と将来的な変遷を予測するための情報を得ること
 - ・ 処分場の設計やレイアウトを決定するための情報を得ること
 - ・ 核種移行解析のためのモデルやパラメータの情報を得ること

これらの情報は、現地での調査結果だけでなく、調査結果の解釈と評価も含めた適用先を考慮して体系的に取りまとめられる。調査により取得されるデータには、現状の地質構造に関連するデータ、水理地質に関するデータ、地球化学に関連するデータ、岩盤力学に関するデータなどのほかに、地史や隆起・侵食などの過去からの情報がある。それぞれの情報は相互に関連しており、調査と評価の担当者は、その解釈を含めて、得られた情報が相互に整合性の取れたものであることを説明しなければならない。スイスではこれらの地質環境情報の整合性を Geosynthesis という理念で表わした。

Geosynthesis は、段階的に実施される調査において、処分の環境を把握する上で、計画時に最も重要な総合理念となる。本節では、特に「場の総合的な理解」という用語で Geosynthesis の理念を表わすこととする。セーフティケースでは、学術的に「安定した地質環境の存在」の明示がステークホルダーに求められており、そのためには、場の総合的な理解が、体系的に実施され

ていることを説明する手法が必要となる。本節では、段階的な調査による場の理解を体系的に理解し、説明するための手法として「調査システムフロー」を開発することとした。

(2) Geosynthesisの具現化：調査システムフローの開発

Geosynthesis の概念を体系的に具現化する方法として「文献調査システムフロー」を新たに開発した。開発した調査システムフローは、原環機構が今後応募地域を対象として実施する文献調査レベルを対象としている。図 4.2.1-1 に文献調査全体を視野に入れた調査システムフローの概念を示す。この調査システムフローは、左側に「概要調査選定時の考慮事項（原環機構技術レポート NUMO TR-02-04）」で記述された項目を、右側に調査する項目で文献等の既往の調査から得られる情報の一覧を示し、その間に専門家の判断や数値解析などによる解釈を通じて、情報が整合性のあるものに取りまとめられていくフローを示している。このフローで重要なことは、作業の進展とともに意思決定をしたプロセスがフローの中に情報として記録されていくため、要件に対する追跡性と意思決定プロセスの透明性を明示することで、ステークホルダーへの説明性が確保できる点である。

(3) 文献調査システムフローの概念

原子力発電環境整備機構（原環機構）では、最終処分施設建設地の選定は「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（2000）」（最終処分法）に基づき行うこととしている。選定における最初の段階である概要調査地区選定では、概要調査地区選定上の考慮事項（原環機構、2004）を指標とし、応募区域及び周辺の地域を対象とした、既存情報を含む文献調査を実施する計画となっている。

文献調査を実施するに当たり、調査システムフローを新たに準備する目的は、概要調査地区を選定する際の考慮事項である「法定要件に関する事項」と「付加的に評価する事項」に対して、網羅性と説明性を考慮しつつ、選定過程の追跡性と透明性を確保しながら体系的に実施する方策づくりにある。文献調査では、まず文献等の資料収集段階で、種類と質の異なる膨大な情報を対象として網羅的で体系的な収集を行い、整理・分析段階では情報・データを整理・分析・加工することにより随時追加・更新することから、予めこれらの業務について品質や信頼性等を確保しながら計画的かつ効率的に実施するための方策が必要となる。調査情報などを透明性と追跡性を確保して体系的に扱うシステムへのニーズとして、調査システムフローを構築した。

(4) 調査システムフローの構成要素

文献調査システムフローを構成する要素は大きく以下のワークパッケージに分類できる。

- ・ 前提条件の整理：法定要件と付加的に評価する事項からの調査項目と調査範囲の設定
- ・ 文献その他資料調査：場の状況を把握するための情報、評価事項に関連した文献情報
- ・ 収集した文献その他資料の整理・分析・解析・判断：場の総合的な理解のための分析、考慮事項を評価するための情報の分析
- ・ 評価：場の総合的な理解、法定要件に対する評価、付加的に評価する事項の評価

調査システムフローで最も重要なことは、調査に求められる要件を明確に整理しておくことである。HLW 処分では、国が規定した最終処分法および概要調査地区選定時の考慮事項(2002年)、土木学会が提示した「概要調査地区選定のための考慮事項(2004)」、処分の実施主体である原環機構がこれらをベースに作成した「概要調査地区選定における考慮事項」がそれにあたる。主たる要件は、法定要件として規定されている安定した地質環境のための除外要件であり、例えば、断層活動、火山火成活動などが該当する。さらに、処分事業の成立性の観点からは、処分場の建設可能性や長期の安全確保の見通しも得ておく必要があり、これらは、「付加的に評価する事項」として取り上げられている。

調査への要件は、図 4.2.1-1 の文献調査システムフローの構造概念では左の欄から文献調査の項目（評価事項に関連した文献情報）のインプットとして取り扱われる。また、要件とともに準備される評価の方法や判断指標は、調査システムフローの右側から「評価」のワークパッケージへのインプットとなっている。文献調査システムフローでは、要件と評価手法および判断指標とを結びつけ、関連性を作業フローの形で明示することで、ステークホルダーへの説明性と作業の透明性及び追跡性を確立することができる。

文献調査システムフローでは、上記要件のほかに、Geosynthesis の理念を具現化するものとして「場の総合的な理解」に関連する作業を取り入れている。評価事項に関する情報の収集および整理・分析、評価の作業パッケージは全てこの「場の総合的な理解」に基づき開始されたとした。地層処分施設の長期挙動や核種移行にかかわる安全評価では、地質環境の長期の変遷、特に地質・地質構造の変遷にともなう地下水流動場の変遷予測が重要な作業となることから、情報の収集では、現状の情報だけでなく、過去からの現状に至るエビデンスや変遷を説明するロジックが求められる。Geosynthesis では情報相互の整合性を取ることが求められ、情報の解釈にも、また長期の変遷予測にも整合性の取れた学術的な判断が求められる。文献調査システムフローではこれらの評価手法や判断指標も記録して残すためのデータベースとも結びつける構造とした。

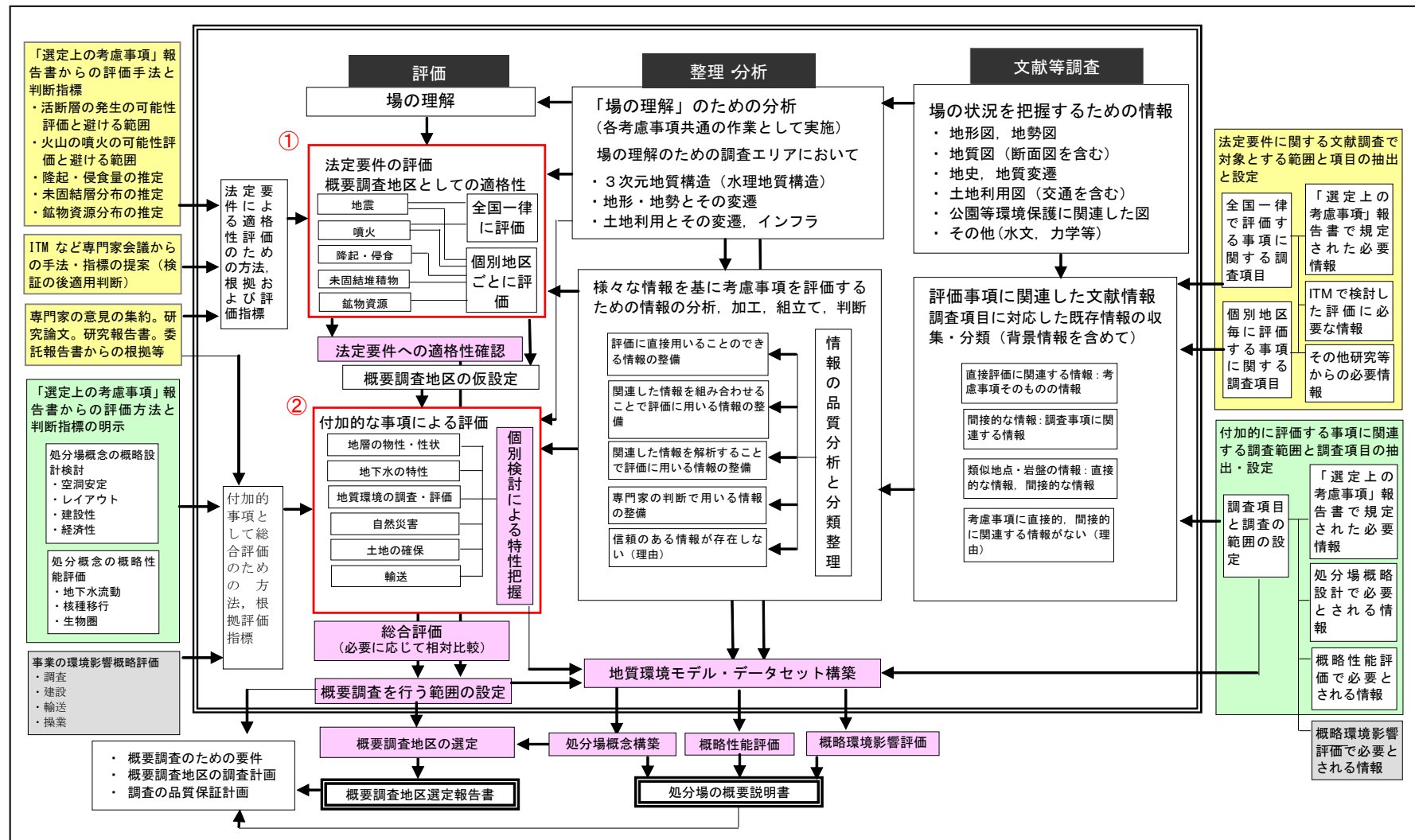


図 4.2.1-1 文献調査システムフローの概念

「法定要件に関する事項」では、全国一律に評価する事項と個別地区ごとに評価する事項があり、それぞれ全国一律の基準や個別の文献調査により概要調査地区としての適格性を評価することになる（図 4.2.1-1 の①の部分）。

全国一律に評価する事項として地震（活断層）と噴火（火山）が該当し、個別地区ごとに評価する事項として地震、噴火、隆起・侵食、第四紀の未固結堆積物、鉱物資源が該当する。整理された関連情報を用いて概要調査地区としての適格性を評価するには、その評価の方法、根拠および評価指標の準備が必要とされる。これらについては、例えば、原環機構の「選定上の考慮事項、2004」に示された評価手法と判断指標が適用される。

- ・ 活断層の発生の可能性評価と避ける範囲
- ・ 火山の噴火の可能性評価と避ける範囲
- ・ 隆起・侵食量の推定
- ・ 未固結層分布の推定
- ・ 鉱物資源分布の推定

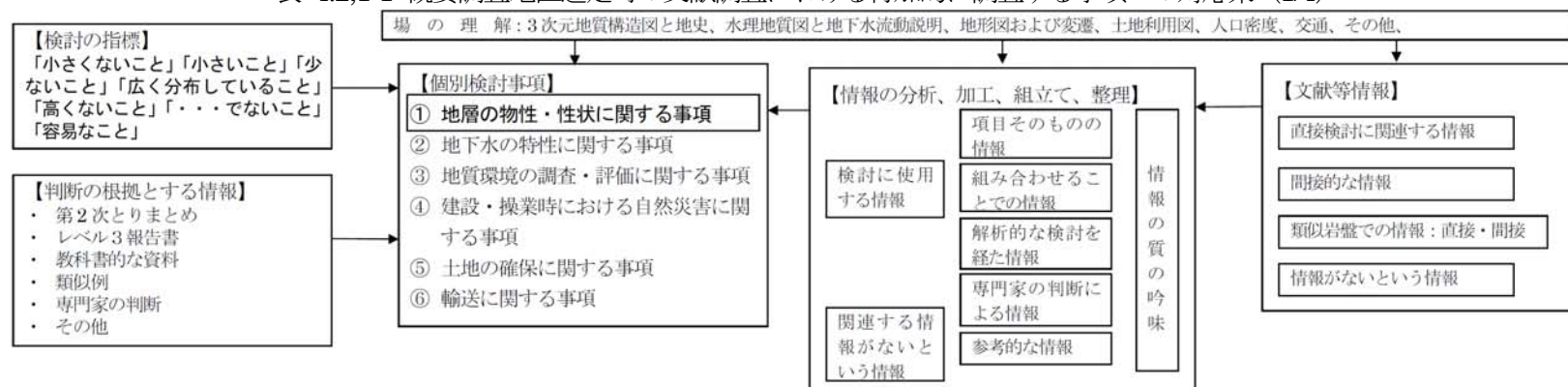
以上の考慮事項のほかに、原環機構では、国内外の専門家と共同で研究している国際テクトニクス会議：ITM 等の成果を事前に公表し、総合的な評価手法や判断指標として用いることを計画している（Tsuchi et al., 2008）。文献調査システムフローでは、評価手法や判断根拠をフローの中で追跡できることが重要で、そのためには、既往の情報を収集・整理する作業にも体系的な関連性が求められる。

「付加的に評価する事項」（図 4.2.1-1 の②の部分）では、以下に示す 6 項目が規定されている（原環機構「考慮事項」、2004）。

- ・ 地層の物性・性状
- ・ 地下水の特性
- ・ 地質環境の調査・評価
- ・ 自然災害
- ・ 土地の確保
- ・ 輸送

付加的に評価する事項について、文献調査システムフローの構造に従い、評価方法および判断指標について吟味し、必要とされる情報・データを体系的に整理した結果を表 4.2.1-1 にまとめて示す。

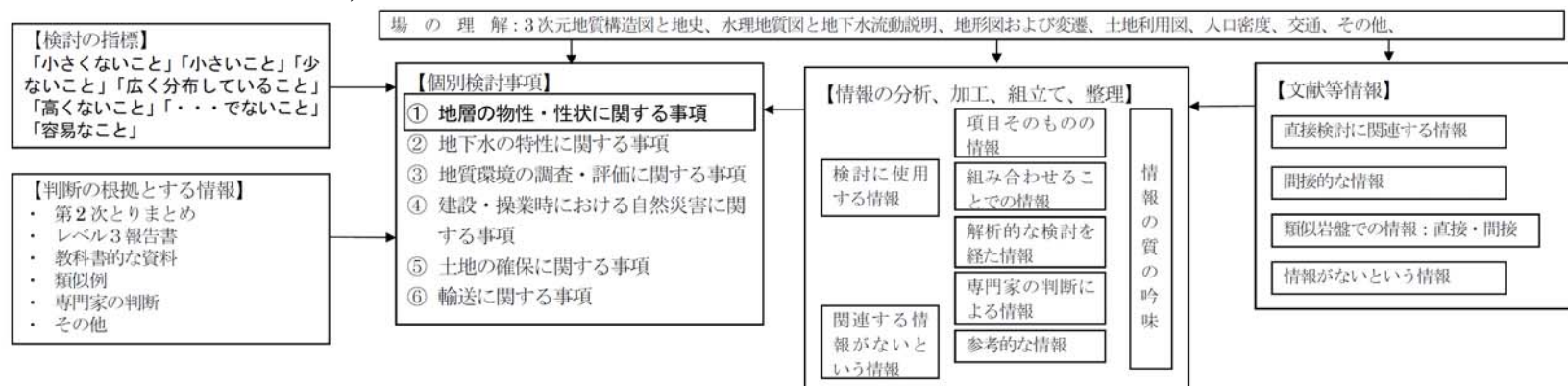
表 4.2,1-1 概要調査地区選定時の文献調査における付加的に調査する事項への対応策 (1/4)



① 地層の物性・性状に関する事項【処分場が合理的かつ安全に、現状技術レベルで構築できる見通しが得られることが評価の目安とする】

判断の根拠のために必要となる情報	検討の指標	個別検討事項	情報の分析・整理	文献等で入手する情報
<ul style="list-style-type: none"> 第2次とりまとめでの岩種と強度との関連 第2次とりまとめでの空洞安定性評価結果 一般的に実施される地山強度比（参考） 類似岩盤での工事実績 概略安定性解析結果と判断の指標（示方書等より） 専門家の判断 	<p>「強度が小さくないこと」</p> <p>強度が小さくないことを客観的に示すためには、強度と安定性を結びつける知見が必要。概略解析はその見通しを得るために実施</p>	1-1 岩盤の強度	<ul style="list-style-type: none"> 報告書等から推定される強度定数 地質とその年代から推定される定数 岩種に関連する統計値からの強度定数 類似地点での強度定数 工事記録から推定される強度定数 概略解析による強度定数の判断の目安 	<ul style="list-style-type: none"> 場の理解から得られる情報 当該地域の岩盤強度定数（調査、試験報告書等） 地質と地質年代 岩種と強度との関係（統計値） 類似岩種での強度定数 工事記録
<ul style="list-style-type: none"> 第2次とりまとめでの変形係数と空洞安定性の関係 類似岩盤での工事実績 変形係数と岩盤強度からの掘削可能性に関するこれまでの知見および専門家の判断 概略空洞安定性解析結果と判断の指標（示方書等より） 割れ目等の性状に対応する補強技術等の適用性 専門家の判断 	<p>「変形が小さいこと」</p> <p>「割れ目・風化・変質が少ないこと」</p> <p>変形については合理的な範囲で処分空洞が建設できるかの判断。岩盤性状の影響については、実例での対応を根拠とする。概略解析（強度との連携）を参照</p>	1-2 岩盤の変形 割れ目・風化・変質の性状	<ul style="list-style-type: none"> 報告書等から推定される変形係数と岩盤の性状に関する情報 地質とその年代から推定される変形係数（岩盤強度とも関連）、割れ目、風化、変質性状の推定 岩種に関連する統計値からの変形係数 類似地点での変形係数 概略解析による変形係数の判断の目安 	<ul style="list-style-type: none"> 場の理解から得られる情報 当該地域の岩盤変形係数・割れ目等の性状に関する情報（調査、試験報告書等） 地質と地質年代 岩種と変形係数との関係（統計値） 類似岩種の変形係数 工事記録
<ul style="list-style-type: none"> 第2次とりまとめ（レベル3報告書）での温度解析結果（どの程度の地温裕度があるかの目安） 地温勾配の幅の中でどの程度のレイアウトが変化するか知見（概略温度解析で判断） 	<p>「地温勾配が小さいこと」</p> <p>3℃/100mを目途に概略の地温勾配幅を判断</p>	1-3 地温勾配	<ul style="list-style-type: none"> 日本全国での地温に関する情報と地域での情報を組み合わせて整理 温泉の分布、火山活動領域の分布からの推定 	<ul style="list-style-type: none"> 当該地点での地温と地温勾配の情報 地質と地質年代 温泉等の情報 火山活動等の情報
<ul style="list-style-type: none"> 処分施設のレイアウト可能性評価（処分概念、廃棄体の埋設密度と処分形態） レイアウトの柔軟性に関するインプット レベル3でのレイアウト（参考） 	<p>「良好な地層が広く分布していること」</p> <p>「良好」＝上記の強度、変形等の性状。「広く」＝岩体形状を含めてレイアウトへの適用性</p>	1-4 岩体の形状・規模	<ul style="list-style-type: none"> 地質・地質構造とその周辺の境界条件および岩体の規模を推察する情報の統合化 空中写真でのキーロックの判読 	<ul style="list-style-type: none"> 当該地域の地質・地質構造に関する情報（地質・地質構造図、空中写真、調査報告書等） 岩体の境界条件、避けるべき断層・破砕帯の分布（深度に対応できる情報）
<ul style="list-style-type: none"> 処分場の設置深度の概略検討結果 性能評価からのインプット（できれば深さに関する目安値） ・ 	<p>「速度が小さいこと」</p> <p>隆起＝侵食量の仮定の下に、10 万年で300m以下の速度を目安</p>	1-5 隆起・侵食の速度	<ul style="list-style-type: none"> 当該地域周辺を含めた隆起・侵食量から隆起速度の推定 GPS 等の情報処理による隆起・沈降量の推定 	<ul style="list-style-type: none"> 当該地域の隆起・侵食量の情報 段丘面判読（空中写真） 地質と地質年代 GPS 等の観測データ
<ul style="list-style-type: none"> 第2次とりまとめでの建設時の安全性、施工計画（異常事態に対する施工方法、補助工法、建設コスト、過去の事例）からのインプット 異常事態が発生するメカニズムの情報 	<p>「発生の可能性が小さいこと」</p> <p>操業期間を対象として「当該地点での発生頻度を予測し（災害危険度作成）対応の可能性を考察」</p>	1-6 異常間隙水圧・膨張性地山・ガス突出・山はね・大出水の可能性	<ul style="list-style-type: none"> 当該地点での工事記録、類似岩盤での工事記録および「強度」、「変形」の情報から可能性を推定 岩種、地質年代、地質構造、水理地質構造からの推定 	<ul style="list-style-type: none"> 当該地域での工事事例 類似岩盤での工事事例 「強度」、「変形」に関する情報 地質・地質構造、地質と地質年代

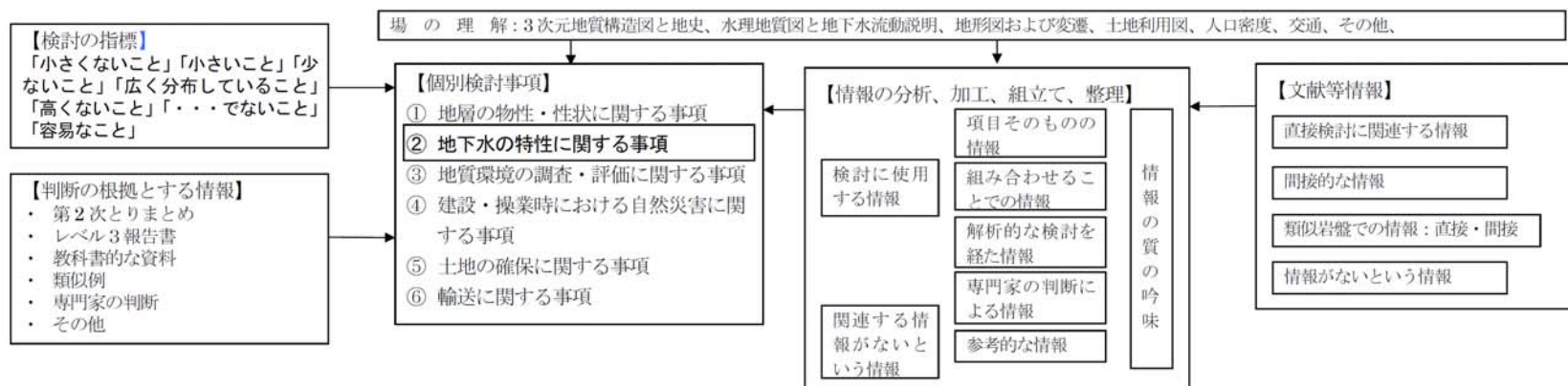
表 4.2,1-1 概要調査地区選定時の文献調査における付加的に調査する事項への対応策 (2/4)



① 地層の物性・性状に関する事項【処分場が合理的かつ安全に、現状技術レベルで構築できる見通しが得られることが評価の目安とする】

判断の根拠のために必要となる情報	検討の指標	個別検討事項	情報の分析・整理	文献等で入手する情報
<ul style="list-style-type: none"> 第2次とりまとめでの岩種と強度との関連 第2次とりまとめでの空洞安定性評価結果 一般的に実施される地山強度比（参考） 類似岩盤での工事実績 概略安定性解析結果と判断の指標（示方書等より） 専門家の判断 	<p>「強度が小さいこと」</p> <p>強度が小さいことを客観的に示すためには、強度と安定性を結びつける知見が必要。概略解析はその見通しを得るために実施</p>	1-1 岩盤の強度	<ul style="list-style-type: none"> 報告書等から推定される強度定数 地質とその年代から推定される定数 岩種に関連する統計値からの強度定数 類似地点での強度定数 工事記録から推定される強度定数 概略解析による強度定数の判断の目安 	<ul style="list-style-type: none"> 場の理解から得られる情報 当該地域の岩盤強度定数（調査、試験報告書等） 地質と地質年代 岩種と強度との関係（統計値） 類似岩種での強度定数 工事記録
<ul style="list-style-type: none"> 第2次とりまとめでの変形係数と空洞安定性の関係 類似岩盤での工事実績 変形係数と岩盤強度からの掘削可能性に関するこれまでの知見および専門家の判断 概略空洞安定解析結果と判断の指標（示方書等より） 割れ目等の性状に対応する補強技術等の適用性 専門家の判断 	<p>「変形が小さいこと」</p> <p>「割れ目・風化・変質が少なこと」</p> <p>変形については合理的な範囲で処分空洞が建設できるかの判断。岩盤性状の影響については、実例での対応を根拠とする。概略解析（強度との連携）を参照</p>	1-2 岩盤の変形 割れ目・風化・変質の性状	<ul style="list-style-type: none"> 報告書等から推定される変形係数と岩盤の性状に関する情報 地質とその年代から推定される変形係数（岩盤強度とも関連）、割れ目、風化、変質性状の推定 岩種に関連する統計値からの変形係数 類似地点での変形係数 概略解析による変形係数の判断の目安 	<ul style="list-style-type: none"> 場の理解から得られる情報 当該地域の岩盤変形係数・割れ目等の性状に関する情報（調査、試験報告書等） 地質と地質年代 岩種と変形係数との関係（統計値） 類似岩種の変形係数 工事記録
<ul style="list-style-type: none"> 第2次とりまとめ（レベル3報告書）での温度解析結果（どの程度の地温裕度があるかの目安） 地温勾配の幅の中でどの程度のレイアウトが変化するかの知見（概略温度解析で判断） 	<p>「地温勾配が小さいこと」</p> <p>3℃/100mを目途に概略の温度勾配幅を判断</p>	1-3 地温勾配	<ul style="list-style-type: none"> 日本全国での地温に関する情報と地域での情報を組み合わせて整理 温泉の分布、火山活動領域の分布からの推定 	<ul style="list-style-type: none"> 当該地点での地温と地温勾配の情報 地質と地質年代 温泉等の情報 火山活動等の情報
<ul style="list-style-type: none"> 処分施設のレイアウト可能性評価（処分概念、廃棄体の埋設密度と処分形態） レイアウトの柔軟性に関するインプット レベル3でのレイアウト（参考） 	<p>「良好な地層が広く分布していること」</p> <p>「良好」＝上記の強度、変形等の性状。「広く」＝岩体形状を含めてレイアウトへの適用性</p>	1-4 岩体の形状・規模	<ul style="list-style-type: none"> 地質・地質構造とその周辺の境界条件および岩体の規模を推察する情報の統合化 空中写真でのキーロックの判読 	<ul style="list-style-type: none"> 当該地域の地質・地質構造に関する情報（地質・地質構造図、空中写真、調査報告書等） 岩体の境界条件、避けるべき断層・破砕帯の分布（深度に対応できる情報）
<ul style="list-style-type: none"> 処分場の設置深度の概略検討結果 性能評価からのインプット（できれば深さに関する目安値） 	<p>「速度が小さいこと」</p> <p>隆起＝侵食量の仮定の下に、10 万年で300m以下の速度を目安</p>	1-5 隆起・侵食の速度	<ul style="list-style-type: none"> 当該地域周辺を含めた隆起・侵食量から隆起速度の推定 GPS 等の情報処理による隆起・沈降量の推定 	<ul style="list-style-type: none"> 当該地域の隆起・侵食量の情報 段丘面判読（空中写真） 地質と地質年代 GPS 等の観測データ
<ul style="list-style-type: none"> 第2次とりまとめでの建設時の安全性、施工計画（異常事態に対する施工方法、補助工法、建設コスト、過去の事例）からのインプット 異常事態が発生するメカニズムの情報 	<p>「発生の可能性が小さいこと」</p> <p>作業期間を対象として「当該地点での発生頻度を予測し（災害危険度作成）対応の可能性を考察</p>	1-6 異常間隙水圧・膨張性地山・ガス突出・山はね・大出水の可能性	<ul style="list-style-type: none"> 当該地点での工事記録、類似岩盤での工事記録および「強度」、「変形」の情報から可能性を推定 岩種、地質年代、地質構造、水理地質構造からの推定 	<ul style="list-style-type: none"> 当該地域での工事事例 類似岩盤での工事事例 「強度」、「変形」に関する情報 地質・地質構造、地質と地質年代

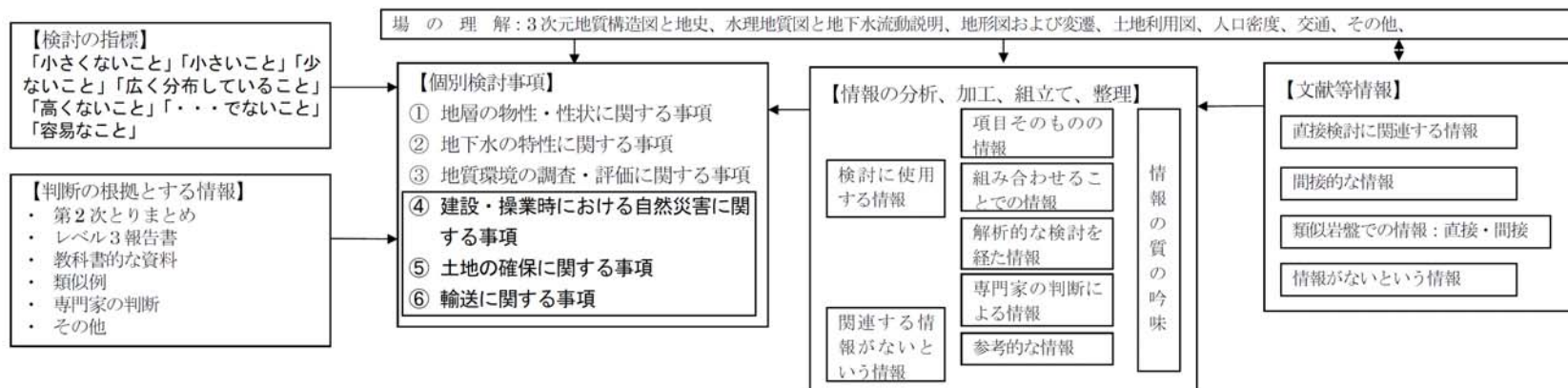
表 4.2,1-1 概要調査地区選定時の文献調査における付加的に調査する事項への対応策 (3/4)



② 地下水の特性に関する事項：【多重バリアシステムによる地下水移行シナリオを基本とした長期安全性確保の見通し】

判断の根拠のために必要となる情報	検討の指標	個別検討事項	情報の分析・整理	文献等で入手する情報
<ul style="list-style-type: none"> 第2次とりまとめでの安全評価の知見(透水係数の幅、動水勾配の幅、地下水流量の幅など) 概略の地下水流動解析の結果(場の理解の一環でも実施) 地下構造物の建設時における地下水流入に対応する技術のレベルの把握(排水システム、グラウト) 地下水の流出領域の情報からの生物圏の推定 専門家の判断 	<p>「流量・流速が小さいこと」</p> <p>「流量・流速」に対する閾値は設定されていないことから、小さいことの判断に対しては第2次とりまとめでの安全評価結果を目安とし、「専門家の判断」に依存した検討が現段階での限界?</p>	2-1 地下水流量・流速	<ul style="list-style-type: none"> 報告書等から推定される流量・流速(直接的な情報は極めて少ない) 「場の理解」から推定される水理地質構造(流出域の推定)と地下水流動場の全般的な説明 当該地点での地形からの動水勾配と岩種に係わる透水係数を用いた概略の地下水流動解析結果(透水係数は、類似岩種および地質年代からの推定等から推定) 	<p>【「場の理解」ために入手する情報と密接に関連】</p> <ul style="list-style-type: none"> 当該地域の流量・流速に関する情報(工事等での調査・試験情報) 地形勾配(地形図) 地質・地質構造図 透水係数の情報 類似岩種の情報(透水係数) 岩盤と透水係数の関係(統計値) 地下水の流出域の情報
<ul style="list-style-type: none"> 水温と安全評価との関連(水温の評価への感度) 水温と人工バリアの劣化に関連する情報 専門家の判断 	<p>「高いこと」</p> <p>地温勾配とも関連し、「高いこと」との判断は第2次とりまとめ等で安全評価での前提で判断</p>	2-2 水温	<ul style="list-style-type: none"> 報告書等から推定される水温情報 地質とその年代から推定される水温(?) 温泉分布、温度および火山活動からの推定水温 	<ul style="list-style-type: none"> 当該地域の水温に関する情報(調査、試験報告書等) 地質と地質年代 温泉の分布とその情報 地温勾配の情報
<ul style="list-style-type: none"> pH値の適正な幅に関する情報：安全評価からの制約、人工バリアの長期健全性からの制約 ナチュラアナログからの判断指標 専門家の判断 	<p>「著しく高いこと、低いこと」</p> <p>安全評価、人工バリアの健全性からの「許容されるpH値の範囲」の設定に基づき判定</p>	2-3 pH	<ul style="list-style-type: none"> pH値の推定幅 深部の地質構造・年代、水理地質構造との総合的な推定値 温泉、湧水に関する情報から推定 	<ul style="list-style-type: none"> 当該地点でのpHにかかわる情報(調査、研究) 井戸水等の分析情報 温泉水の分析情報 地質構造と地質年代 温泉の分布とその情報 地温の情報
<ul style="list-style-type: none"> 第2次とりまとめ等で安全評価からの制約 ナチュラアナログからの判断指標 専門家の判断 	<p>「地層、地下水が広く酸化されていないこと」</p> <p>酸化されていないことが安全確保の絶対条件にならないことに留意し、推定値の可能性のみを論じる</p>	2-4 酸化還元性	<ul style="list-style-type: none"> 酸化還元電位の推定幅 水理地質構造、地質構造(年代)からの推定 鉱物分布からのナチュラアナログ情報を考慮した推定値 	<ul style="list-style-type: none"> 当該地域での酸化還元電位に関する情報(調査、研究) 地質と地質年代 鉱物分布、鉱山の存在 類似岩盤地域での情報 ナチュラアナログ情報

表 4.2.1-1 概要調査地区選定時の文献調査における付加的に調査する事項への対応策 (4/4)



④ 建設・操業時における自然災害に関する事項：【ジェネリックな建設・操業イメージと当該地域で想定される自然災害との対応性からの判断】

判断の根拠のために必要となる情報	検討の指標	個別検討事項	情報の分析・整理	文献等で入手する情報
<ul style="list-style-type: none"> 処分事業の展開とその期間 自然災害発生頻度の求め方（想定する自然災害の種類とその規模の推定方法） 専門家の判断 	<p>「発生の可能性が小さいこと」</p> <p>当該地域での発生の可能性（大きさ含めて）と対応策の信頼性からの判断</p>	<p>4-1 地震・地すべり・洪水等重大な自然災害の発生可能性</p> <p>（周辺環境への影響としての評価はここでは考慮しない）</p>	<ul style="list-style-type: none"> 当該地域での自然災害に関する情報から、今後の発生頻度を予測（地形、降雨量、地震活動度、洪水記録等個別地点での情報の統合化） 対応策（技術）の現状レベルの分析 	<ul style="list-style-type: none"> 当該地域での過去の自然災害に関する情報（文献、研究報告書等） 対応策（技術）の現状 空中写真判読（過去の変遷） 今後の予測：地震・津波等

⑤ 土地の確保に関する事項：【当該地域で想定される調査・建設・操業に必要な面積と現在の土地利用形態との比較】

判断の根拠のために必要となる情報	要 求	個別検討事項	情報の分析・整理	文献等で入手する情報
<ul style="list-style-type: none"> 概要調査計画の骨格情報 処分場のイメージ 建設・操業のイメージ 	<p>「土地確保が容易なこと」</p> <p>必要と想定される土地の面積（左側のインプット）と当該地域の土地利用の現状（文献情報）および制約（文献情報）から判断。容易さはコストに反映？</p>	<p>5-1 土地の確保の容易性</p> <p>（所有者の情報は容易性の判断としては考えない；別途社会的制約として考慮）</p>	<ul style="list-style-type: none"> 土地利用および所有者の区分 法律上等の制約の整理 新規開発の可能性 	<ul style="list-style-type: none"> 「場の理解」の更なる詳細情報 <ul style="list-style-type: none"> 現状の土地利用、所有権、 将来の利用計画 制約条件（環境保護等） 空中写真判読

⑥ 輸送に関する事項：【想定される輸送形態を対象に、当該地域でのインフラ整備状況の現況からの判断】

判断の根拠のために必要となる情報	要 求	個別検討事項	情報の分析・整理	文献等で入手する情報
<ul style="list-style-type: none"> 概略の輸送計画 <ul style="list-style-type: none"> 輸送の対象と頻度 輸送方法とインフラ 輸送上の制約条件 概略費用 	<p>「輸送が容易なこと」</p> <p>想定される輸送方策と当該地点の現状のインフラ状況から、将来の展開性、柔軟性、輸送にかかる概略費用等からの判断</p>	<p>6-1 利用可能な港湾または港湾候補地からの距離等の輸送の容易性</p> <p>（社会的な制約からの容易性は判断しない）</p>	<ul style="list-style-type: none"> 当該地域における現状のインフラ施設の能力、将来の展開性に関する情報の整理と分析 当該地点における法律上の制約の整理 	<ul style="list-style-type: none"> 「場の理解」の更なる詳細情報 <ul style="list-style-type: none"> 港湾施設 道路・鉄道 制約条件等 空中写真判読

(5) 調査システムフローのIT化

調査システムフローの実業務への適用を考慮し、IT化への展開を図った。IT化において具備すべき要件を設定した上で、システムフローの設計での対応策を検討した結果を表 4.2.1-2 に示す。

表 4.2.1-2 文献調査システムフローが具備すべき条件と設計対応策

システムフローが具備すべき要件	システムフローの設計での対応策
1. システムフローでは、作業の流れと作業相互の関係が図式化され、作業の現在位置（座標）を認識できること	作業の進展がオンタイムで複数の画面で同時に確認できるシステムを設計する
2. システムフローは、文献調査の進展に対応して、段階的に改良・改善できる柔軟性を有していること	システムフローを構成する事項・要素・作業をブロック化あるいはパッケージ化することで、部分的にリプレースできるように設計する
3. システムフローでの各作業内容が明確に記述されていること（IT化への基本要件）	作業を示す枠組みそのものが属性を有し、実施する内容が詳細に記載されている、あるいは変更点の履歴を含めて記録できるように設計する
4. 実施した作業の結果が記録できること（品質保証およびIT化の基本要件）	記録情報データベースとの結合を図るインターフェースを導入する。データベースでは、追跡性を確保するために、誰がどのような情報に基づいて作業をしたかが記録できる
5. 最終的には担当者以外の人が概要調査地区の選定がどのように実施されたかを追跡・再現できること	確定した流れを表示し、かつ関連した情報を意思決定のプロセスに対応して追跡できるシステム設計とする

上記の設計システムフローが具備すべき要件と設計での対応策に基づき、文献調査システムフローをIT化した。IT化した調査システムフローは、いくつかのサブシステムに分割されている（上記の要件対応）。一例として、火山・火成活動に関する作業項目の連関分析を図化したものを図 4.2.1-2 に示す。図 4.2.1-2 では、文献調査の対象となる地区ごとの文献情報の収集（緑線の枠）と火山・火成活動の情報（赤線の枠）を調査システムフローの「文献その他資料情報ワークパッケージ」にインプットする状況を示している。「文献その他資料情報ワークパッケージ」では、火山・火成活動以外の情報も評価に必要な情報として整備し、次段階の「情報の整理・分析ワークパッケージ」に展開されていく。最終的に概要調査地区としての適格性を評価する「検討・評価ワークパッケージ」では、「情報の整理・分析ワークパッケージ」からのインプットを用いて、別途規定される評価手法や判断指標を用いて評価された結果が表示され・記録される。

図 4.2.1-3 には、これらの作業連関をIT化した例を示す。IT化することで、学術的に実施される火山・火成活動に関する概要調査地区の適格性の判断について、多くのステークホルダーが追跡可能となる。

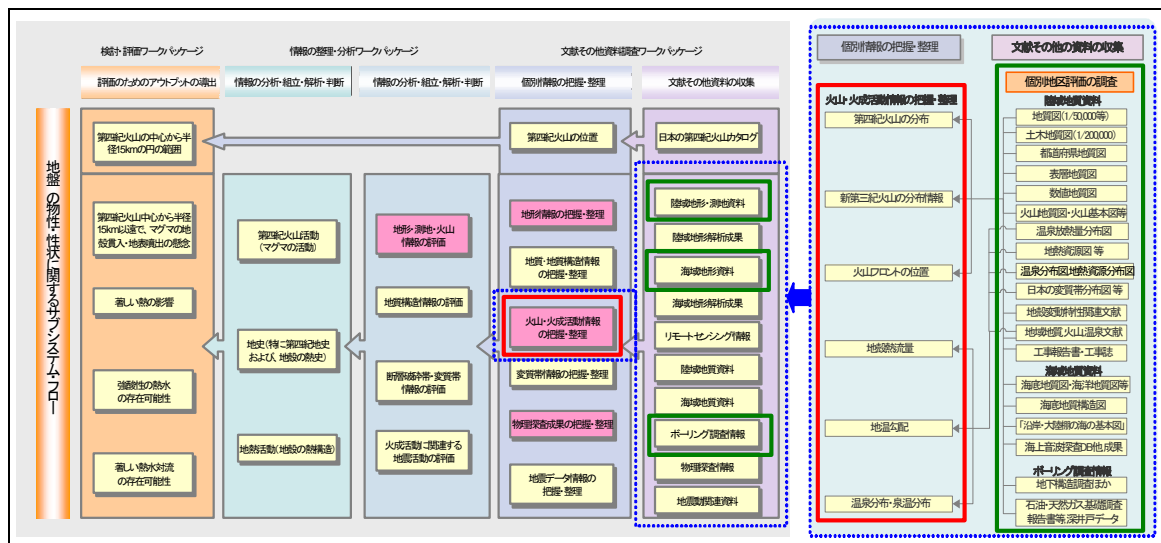


図 4.2.1-2 火山・火成活動に関する調査システムフローの作業連関図

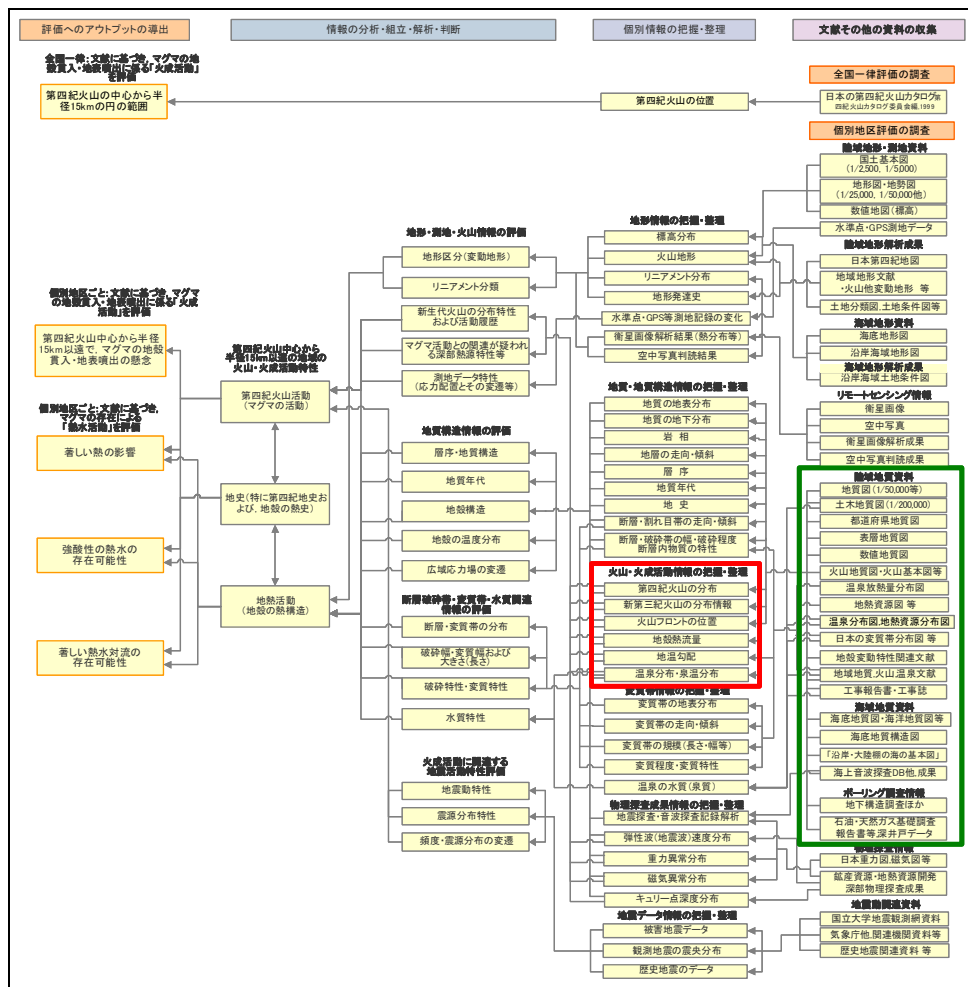


図 4.2.1-3 火山・火成活動の調査システムフロー

(6) まとめと今後の展開

セーフティケースへの科学的なアプローチとして、Geosynthesis に基づく文献調査システムフローを開発した。文献調査システムフローは、HLW 処分のセーフティケース構築の基本となる「場の総合的な理解」や「処分地としての適格性を評価」を行うにあたり、関連する情報の収集やその分析、評価に用いられる学術的な判断を、要件とともに体系的な作業フローとして表わし、作業の追跡性と説明性を確立することで、セーフティケースに対するコンフィデンス・ビルディングの役割を果たすことが可能である。

今後は、IT 化した本システムの実務への適用を通じて改良を重ね、最終的にはステークホルダーに提示することで、概要調査地区の選定作業の追跡性と透明性を提示する手法として確立していく。

【参考文献】

- 1) Nagra(1995) : Wellenberg Site Characterization Programme
- 2) 土木学会原子力土木委員会地下環境部会 (2001) : 概要調査地区選定時に考慮すべき地質環境に関する考え方
- 3) 原環機構 (2004) : 概要調査地区選定の考慮事項の背景と技術的根拠 (NUMO-Tr-04-02)
- 4) 土宏之、小池章久、納多勝、佐藤晶子、河村秀紀、安井勝俊 (2006) : 概要調査地区選定における文献調査のための調査システムフローの開発、第 61 回土木学会年次学術講演会
- 5) 小池章久、土宏之、納多勝、佐藤晶子、河村秀紀、安井勝俊 (2006) : 概要調査地区選定のための火山・火成活動に関する調査システムフローの開発、第 61 回土木学会年次学術講演会

4.2.2 地下水流動場の変動予測に関する研究

(1) 研究の背景

本節ではセーフティケースへの科学的アプローチとして、場の総合的な理解に不可欠な地下水流動場の変動予測に関する研究事例を記述する。

わが国での放射性廃棄物処分における安全評価において最も蓋然性の高いシナリオは、地下水による放射性核種の人間環境への移行である。原子力安全委員会が 2002 年に公表した「高レベル放射性廃棄物地層処分における安全確保の基本的考え方」では、「地下水移行シナリオ」と規定されている。地下水移行シナリオによる安全評価では、地下水流動経路に沿った放射性核種の移行遅延機能として物質の移流・分散・拡散に伴う収着や吸着現象等を対象としている。

処分の安全性をセーフティケースとして説明するには、将来にわたる地下水流動場の変遷を科学的に予測し、分りやすく提示することが求められる。

(2) 地下水流動解析による予測手法と解析対象

将来にわたる地下水流動場の変遷を予測するための研究は、まず当該サイトの地下水流動特性に関する情報から現状の地下水流動場のモデルを作成し、地史や地下水年代の情報等から過去にさかのぼり、現状の地下水流動がどのようなプロセスで構築されてきたかを分析することから開始する。また、過去から現在そして将来の変動については、わが国で確実に発生する隆起・侵食、海水準変動を考慮した塩水・淡水の混合問題を、非定常の地下水流動・物質移行解析を基にしたパーティクルトラッキングにより評価する。本研究では、解析対象領域として沿岸地域で堆積岩が分布する三浦半島を想定し、図 4.2.2-1 に示すように、海域を含む東西方向 23km×南北方向 31km の矩形モデルとした。

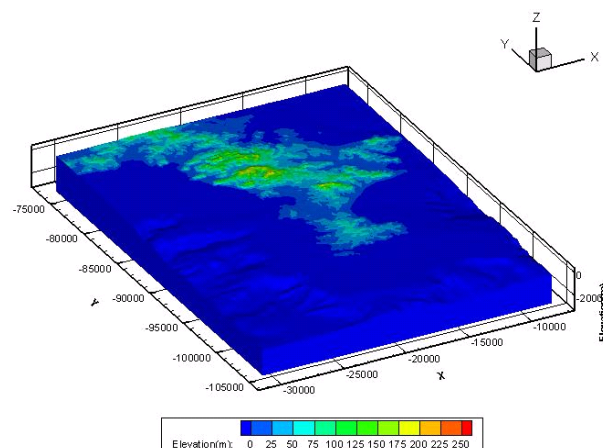


図 4.2.2-1 解析領域の地形鳥瞰図

(3) 水理地質構造モデル

当該領域の陸域中央部付近には標高約 240m の山地・丘陵地を想定した。また、海域には、幅数 km の大陸棚が分布し、その西方は急激に水深が深くなる地形構造を呈している状況とした。

表 4.2.2-1 に本検討における解析モデルの構築方針を整理した。解析対象は、図 4.2.2-2 に示すように下位から堆積層が分布する。対象には複数の堆積層が分布するが、本検討では数 10km オーダの広域スケールを対象とすることから、詳細な地層構造分布を反映したモデル化でなく単一の地層モデルを構築する。ただし、当該領域で確認されている大規模な地表断層 4 本は、モデル領域内に特徴的な地質構造としてモデル化した。地層の透水特性は、堆積岩地域に見られる透水係数の深度依存性を考慮することとし、図 4.2.2-3 に示すように 1,000m で 3 オーダ低下する透水係数の深度方向分布を設定した。地表断層の透水係数は高透水性であるとし、透水係数 $1.0\text{E-}06(\text{m/s})$ 、幅 10m を仮定した。

表 4.2.2-1 水理地質構造モデルの構築方針

区分	地質構造	水理地質構造
母岩	単一地層	透水係数の深度依存性を考慮 (図-3 参照)
断層構造	4 本の断層帯 (衣笠断層, 北武断層, 武山断層, 南下浦断層)	透水係数 : $1.0\text{E-}06(\text{m/s})$ 幅 : 10(m)

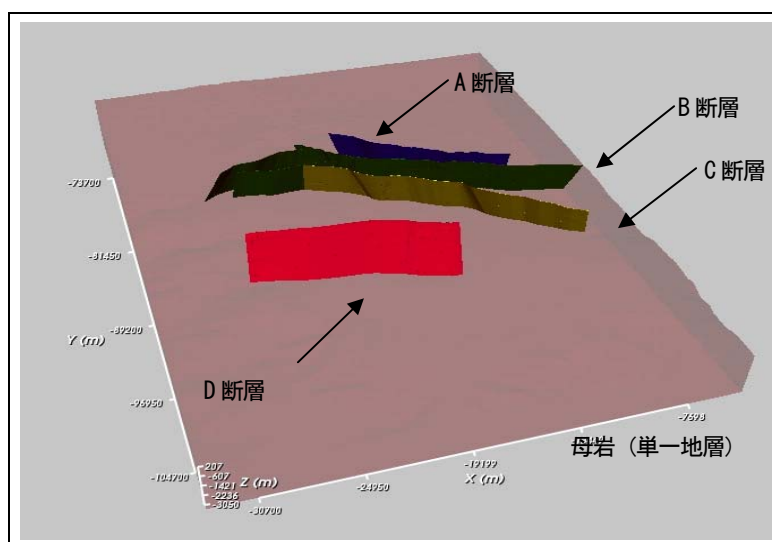


図 4.2.2-2 解析モデルの水理地質構造

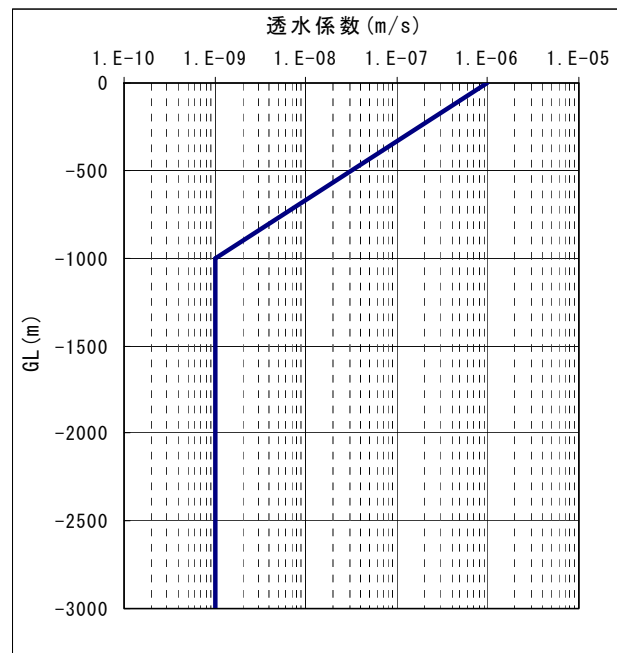


図 4.2.2-3 母岩に設定した透水係数の深度依存性

(4) 解析条件

(i) 境界条件

本解析で設定する境界条件を表 4.2.2-2 に整理した。予測解析では、長期の天然事象である海水準変動や隆起・沈降・侵食変動という非定常な境界条件を考慮し、解析モデルの上面に時間変動境界を設定する。以下に地表面に設定する境界条件を示す。

① 海水準変動

汎世界的な海水準変動については、地質学的、あるいは古生物学的な研究によって過去の海水準変動の周期性、および海水準高度などが図 4.2.2-4 に示すように整理されている。過去には海水準が低下する氷期と上昇する間氷期を繰り返し、最盛期における海水準高度は、概ね現海水準から+5~-120m 程度である。過去の海退・海進の変遷をみると最海進時の約 120,000 年前から約 20,000 年前までの間は海退期で、その後約 6,500 年前までの間が海進期にあたる。また、現在は海退期の初期段階にあると推定できる。

将来の海水準変動は、過去の海退・海進の繰り返しが将来も起こると仮定し、外挿することで推定することができる。本解析では、図 4.2.2-5 に示すように海退期:85,000 年間、海進期:15,000 年間の線形的な変動を設定した。

表 4.2.2-2 境界条件の設定

	圧力条件		濃度条件
上面	陸域	地表面で水頭固定	濃度フラックス境界 $F_c = \begin{cases} (q \cdot n)c & q \cdot n \geq 0 \\ (c - c_0)/\delta & q \cdot n < 0 \end{cases}$ F_c : 濃度フラックス q : ダルシー流速 n : 法線ベクトル (流出方向を正) c : 濃度 c_0 : 流入濃度
	海域	海底面で水頭固定 (海水の密度を考慮)	
底面	不透水境界		相対濃度 1 固定
側面	不透水境界		濃度自由境界

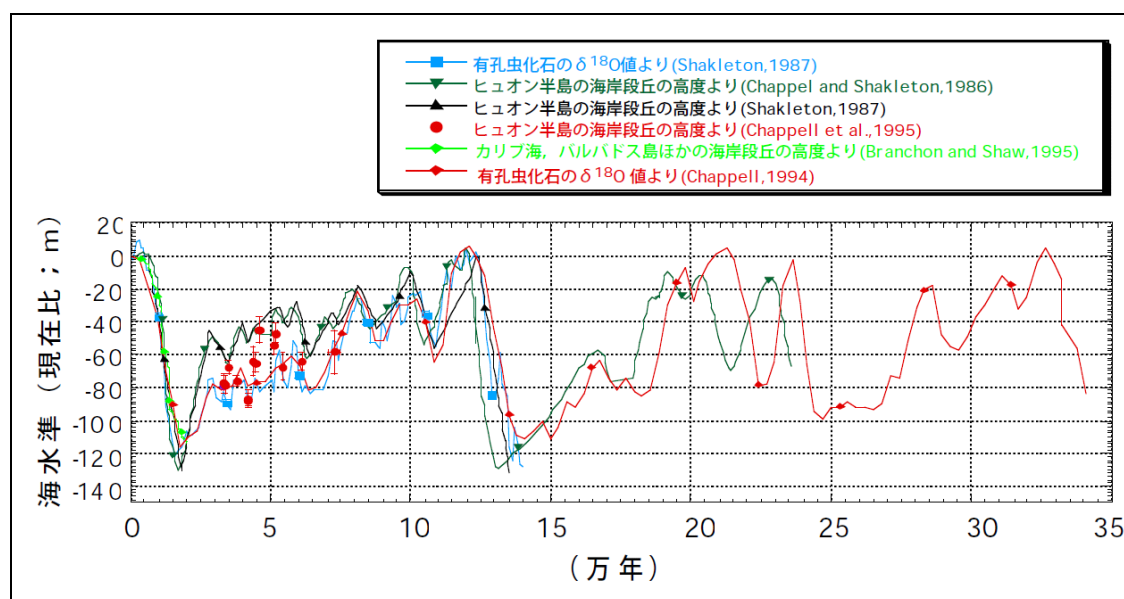


図 4.2.2-4 350,000 年前以降の海水準変動 (核燃料サイクル開発機構, 1999)

② 隆起・沈降・侵食活動

モデルに用いた三浦半島の隆起・沈降に関する既存情報としては、測地学的手法、地形学的手法および地質学的手法によって求められた、隆起量および隆起速度に関する情報がある。例えば、小池・町田 (2001) によると、海成段丘の分布高度と年代を基に推定された三浦半島の過去 10

万年間の地殻変動特性は、傾動速度が最大で 1m/1,000 年以上の速度で隆起したところを含む地域とされている。一方、侵食量に関する情報は十分蓄積されていない。以上のことから、本予測解析では、図 4.2.2-5 に示すように隆起速度として 1m/1,000 年を設定し、侵食は考慮しないこととした。

将来の海水準変動量予測では、海水準変動と隆起・沈降の地殻変動量を合成し、現在の海水準からの「相対海水準変動量」として評価する必要がある。予測解析では、図 4.2.2-5 の赤線で示す相対海水準変動曲線を用いることにした。モデル上面に設定する時間変動境界条件として、この相対海水準変動曲線を参照し、時間ステップ毎に相対海水準の位置を考慮した圧力境界および濃度境界を設定する。本予測解析で対象とする時間は、過去 125,000 年前から将来 195,000 年後の合計 320,000 年間である。

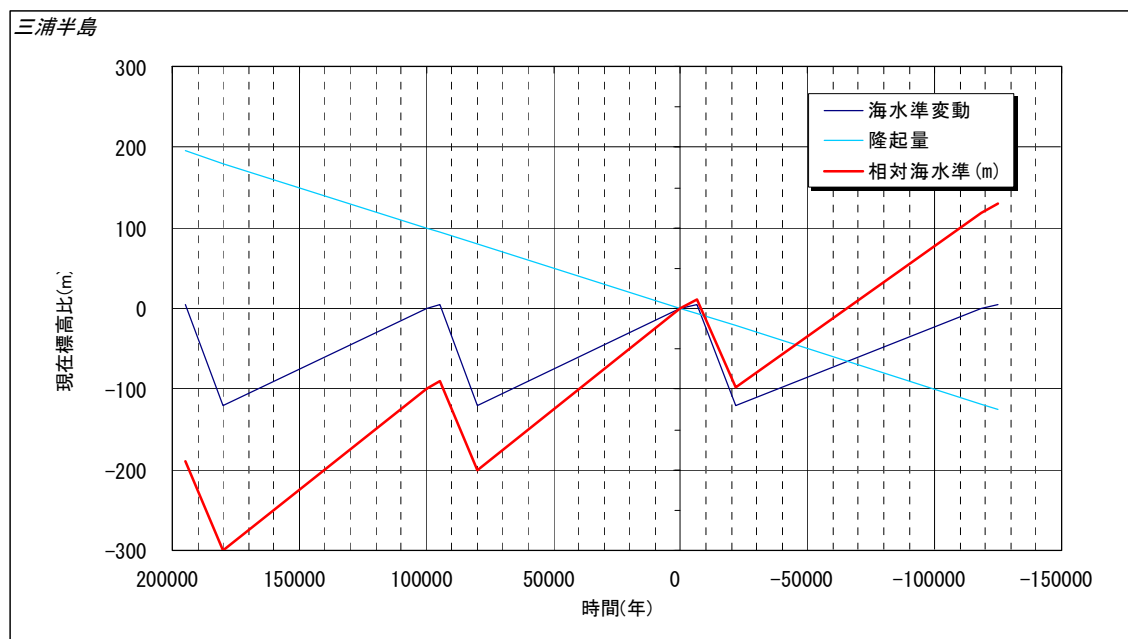


図 4.2.2-5 想定した海水準変動、隆起変動および相対海水準変動曲線

(ii) 物質移行パラメータ

今回設定したモデル領域には海域が含まれており、陸域から浸透する淡水と海域に存在する海水という密度の異なる流体を取り扱わなければならない。したがって、本解析では密度流を考慮した移流分散解析を行うことにした。移流分散解析に必要な主パラメータを表 4.2.2-3 に示す。移流分散解析で重要なパラメータの一つである分散長の設定方針を以下に述べる。

一般的には、縦方向の分散長（縦分散長）は図 4.2.2-6 に示すように移行距離に比例し、概ね

移行距離の 1/10 程度の値になると考えられている (Gelhar, L.W., 1986, Fetter, C.W., 1999)。また、横方向の分散長 (横分散長) は、縦分散長の 1/10～1/100 程度になる傾向がある。このようにスケール依存性が考慮されているが、実際にはバラツキが大きく、不確実性の高いパラメータであるといえる。本予測解析では、モデルスケールを考慮して縦分散長を 1,000m (モデルスケールの約 1/20～1/30)、横分散長を 100m (縦分散長の 1/10) と仮定する。

表 4.2.2-3 移流分散解析に必要なパラメータの設定値

パラメータ	単位	設定値
縦分散長	m	1000
横分散長	m	100
淡水の密度	kg/m ³	1000
海水の密度	kg/m ³	1035
海水の拡散係数	m ² /s	1.0E-09

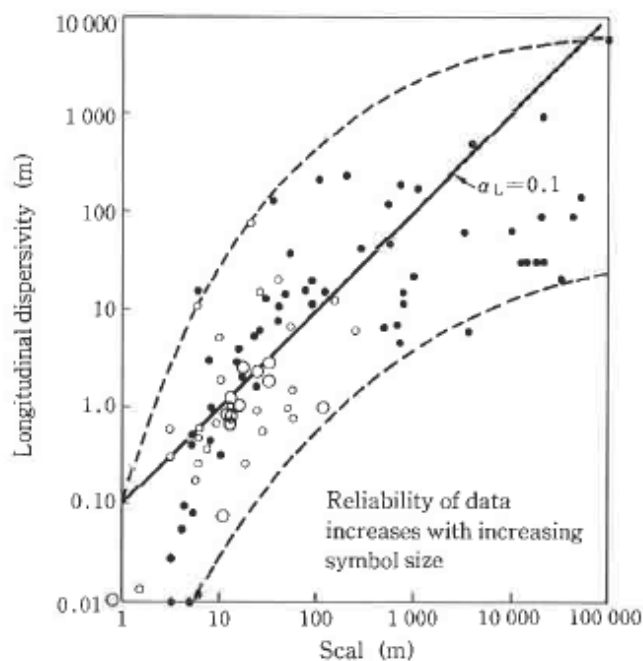


図 4.2.2-6 縦分散長のスケール依存性 (Gelhar, L.W., 1986)

(5) 地下水流動解析

本研究では、淡水と海水の密度流を考慮した 3 次元非定常移流分散解析を行った。解析には地

下水流動解析コード CONNECTFLOW Vesion9.5（開発者：SERCO Group plc）を使用した。
本コードは、海外の放射性廃棄物処分実施主体（NAGRA, SKB, POSIVA）における地下水流動評価に関するプロジェクトで多くの実績を有する。

過去 125,000 年前から現在、現在から将来 195,000 年後を対象として実施した地下水流動解析結果を以下に示す。

(i) 過去から現在までの地下水流動解析結果

現在から 124,500 年前（最海進時から 500 年経過後）の塩分濃度分布（相対塩分濃度で表示、海水：1、淡水：0、以下同様）を図 4.2.2-7 に示す。この時期の相対海水準は現在標高比で+130m であることから、モデル領域のごく一部に淡水が浸透する陸域部が存在するため、モデル内の大部分は塩水が占める結果となっている。

現在から 21,500 年前の塩分濃度分布を図 4.2.2-8 に示す。この時期の相対海水準変動は現在標高比で-98.5m であり、124,500 年前からの海退が進み、陸域が拡大している。それに伴い、陸域から浸透した淡水による塩水の洗い出しが生じており、標高の高い陸域中央部や高透水性の断層帯が分布する箇所では比較的深部まで淡水が浸透している。

現在から 6,500 年前の塩分濃度分布図を図 4.2.2-9 に示す。この時期は再び海進が進んだ時期であるが、隆起活動の影響により前回の最海進時よりは現在標高比が低い+11.5m である。塩分濃度分布をみると最海退期から海が陸域に戻ってきている状況が確認できるが、過去の最海進時よりは陸域の領域が大きい。特徴として、海底下の比較的浅い深度に海水よりも濃度の小さい領域の分布が広く認められる点がある。これは、海退期に浸透した淡水浸透領域が、海進に伴う海岸線の移動に追従できなかったために海水と淡水の混合領域が形成されたと解釈できる。

(ii) 現在から将来の地下水流動解析結果

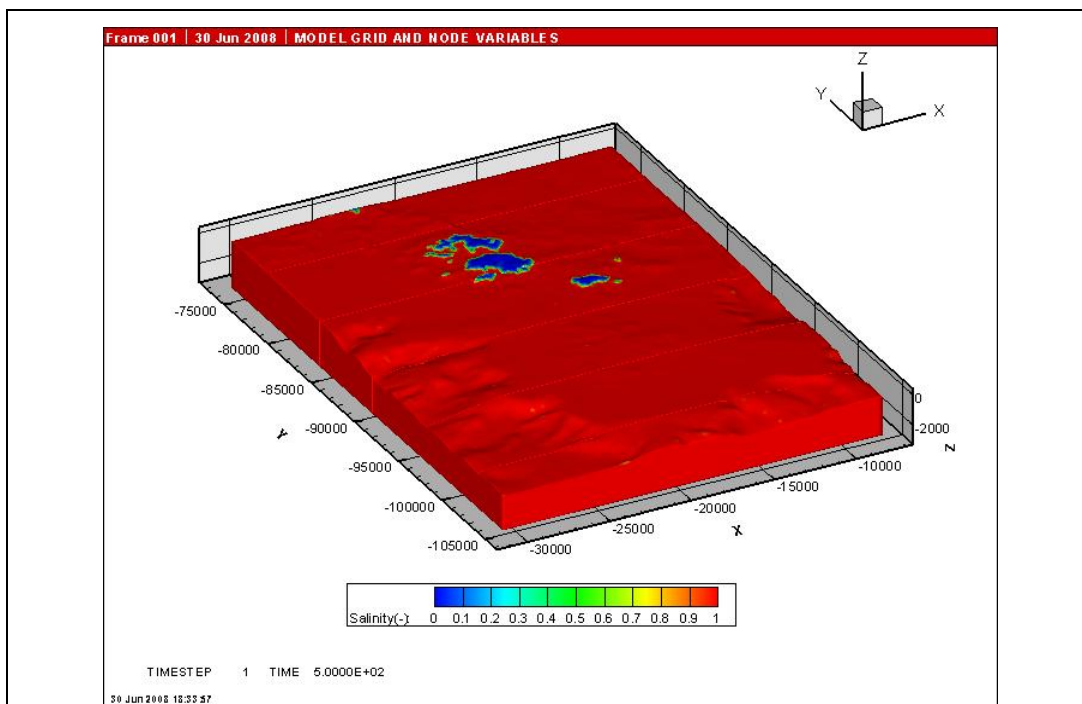
現在の塩分濃度分布を図 4.2.2-10 に示す。現在は相対海水準変動曲線に示したように海退期の初期段階にある。大局的には現在標高比 0m にある現海岸線付近に塩水と淡水の分布境界が分布するが、現在から 6,500 年前の結果と同様に、一部の箇所で海底下の浅層部に塩分濃度の低い領域が認められる。

現在から 80,000 年後（将来における最初の最海退時）の塩分濃度分布を図 4.2.2-11 に示す。この時期の相対海水準は現在標高比で-200m であることから、半島の東西方向の幅が大きくなり淡水の浸透領域が拡大していることがわかる。

現在から 95,000 年後の塩分濃度分布を図 4.2.2-12 に示す。この時期は将来における最初の最海進時であるが、隆起活動の影響により、相対海水準は現在標高比で-90m の位置になっている。したがって、直近の最海進時よりは淡水の浸透領域は縮小しているが、現在よりは淡水の浸透領域が大きいことが分かる。

現在から 180,000 年後の塩分濃度分布を図 4.2.2-13 に示す。2 回目の最海退時であり、相対海水準は現在標高比で-300m まで低下する。このことからモデル領域内の海域は、急峻な海底谷が分布する箇所のみとなり、陸域からの淡水が深部まで浸透している状況が認められる。

現在から 195,000 年後の塩分濃度分布を図 4.2.2-14 に示す。2 回目の最海進時となるが、相対海水準は現在標高比で-190m に位置している。つまり、モデル領域内に海域が拡大するが、陸域の占める部分が大きく淡水の分布範囲が大きいことが分かる。



a) 全体鳥瞰図

(b) 鉛直断面図

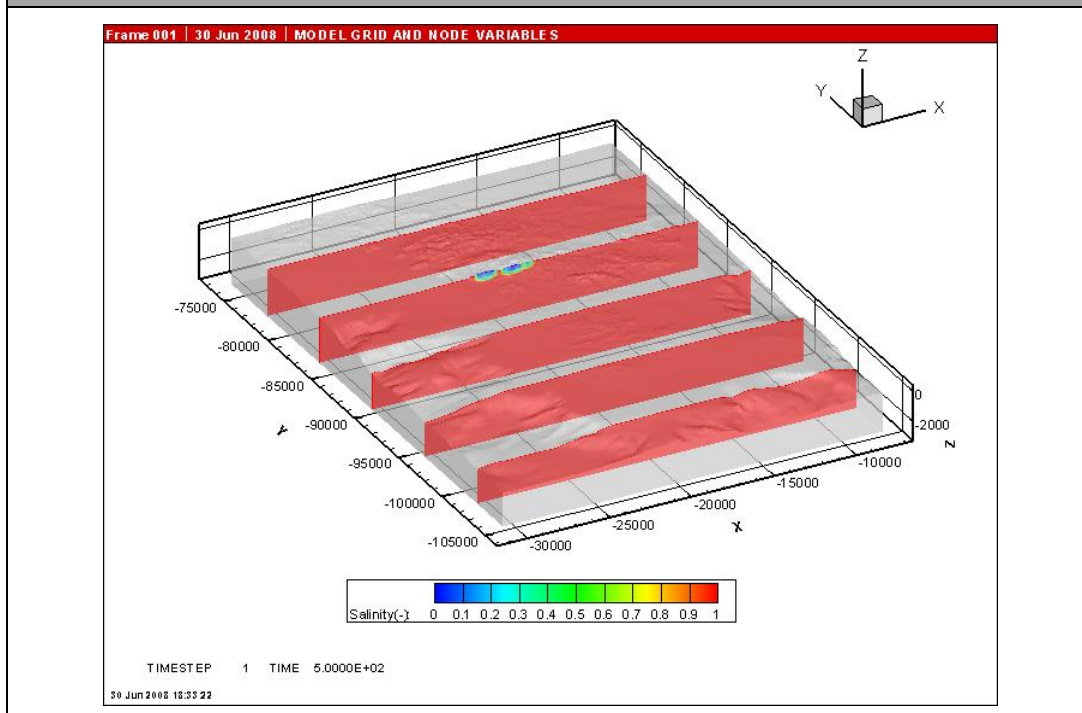
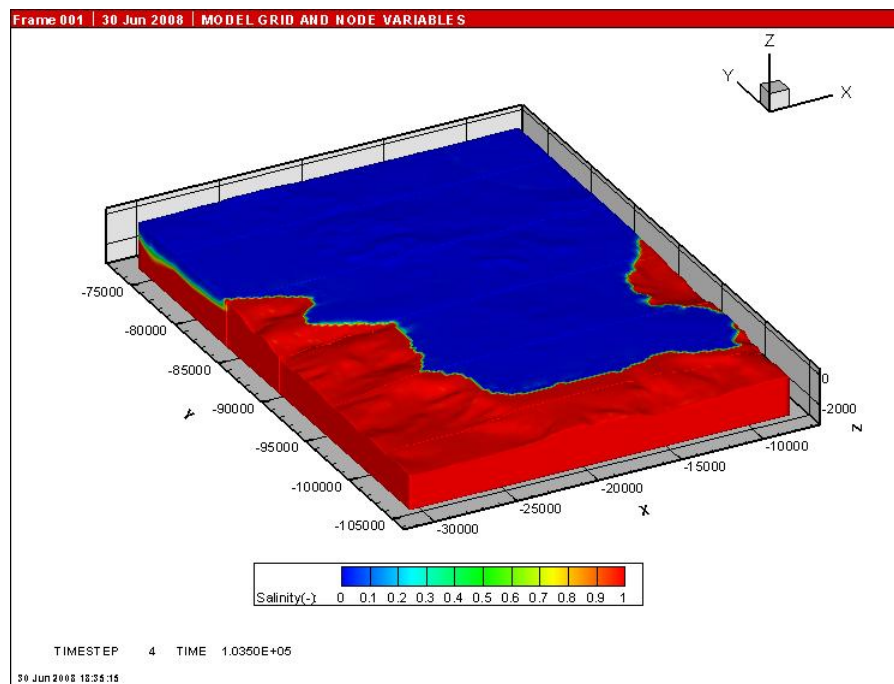
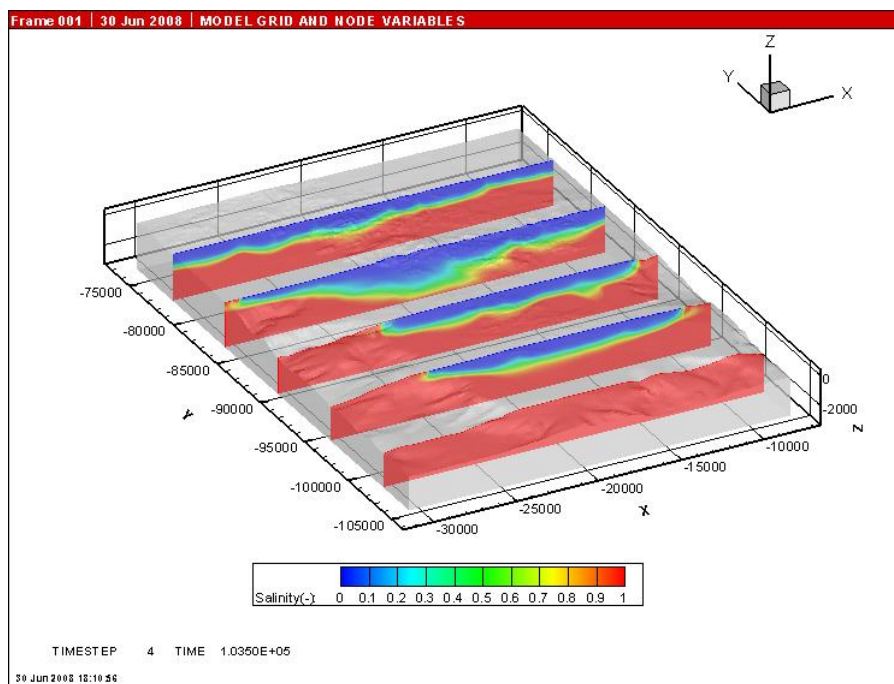


図 4.2.2-7 地下水流動解析結果-塩分濃度分布-124,500 年前

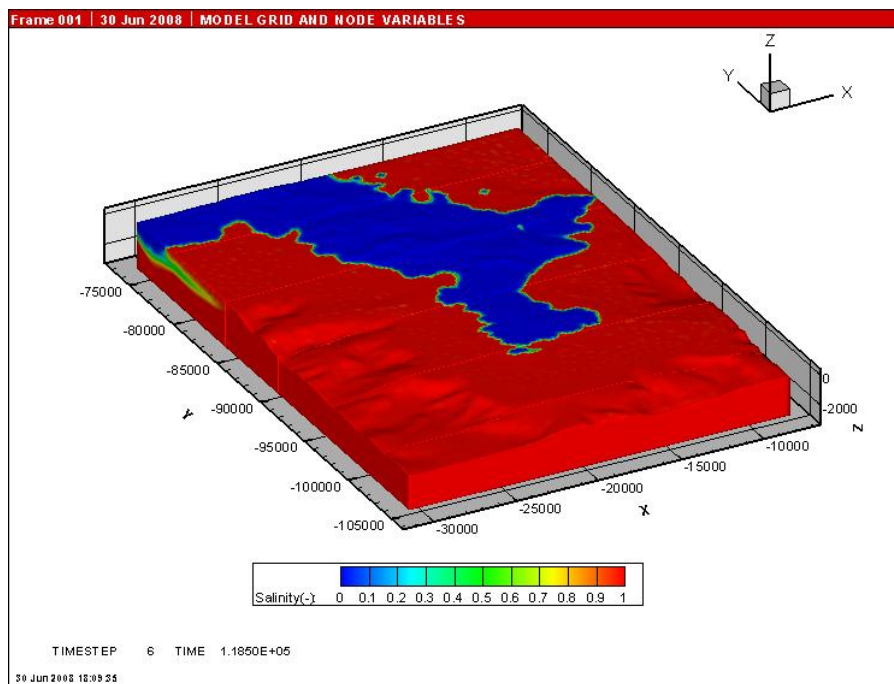


(a) 全体鳥瞰図

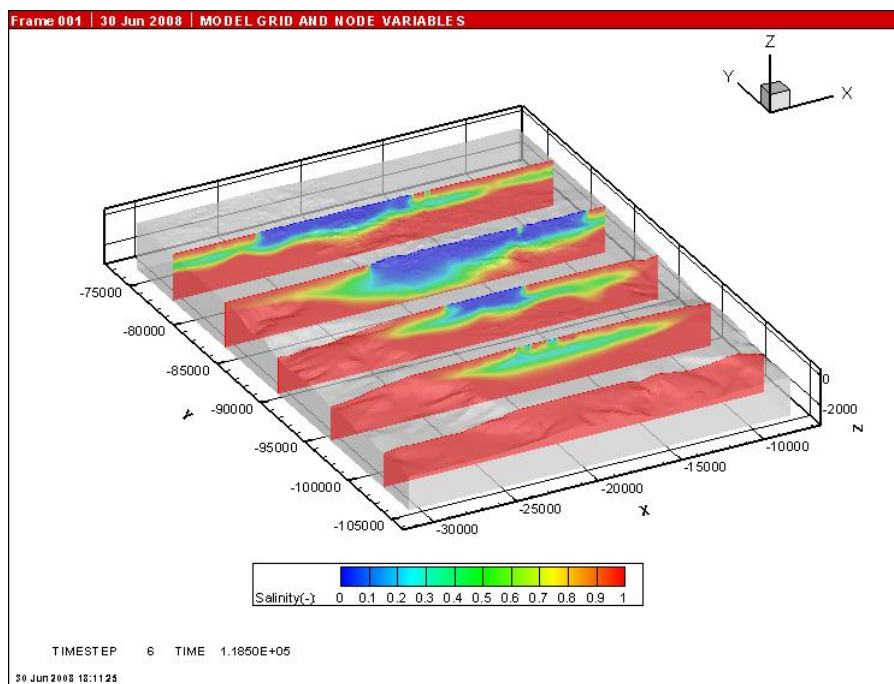


(b) 鉛直断面図

図 4.2.2-8 地下水流動解析結果-塩分濃度分布-21,500 年前（最海退時）

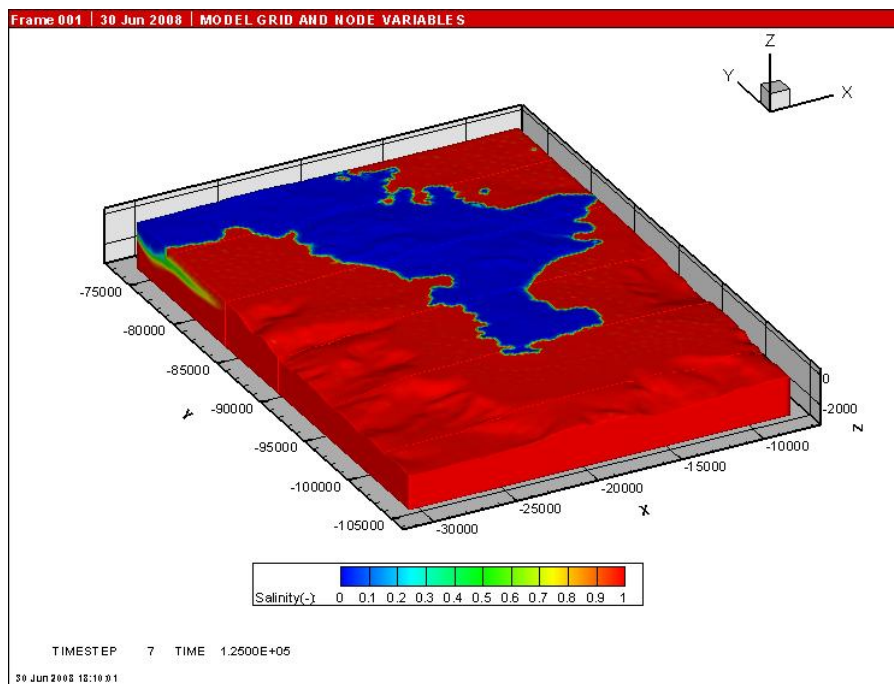


(a) 全体鳥瞰図

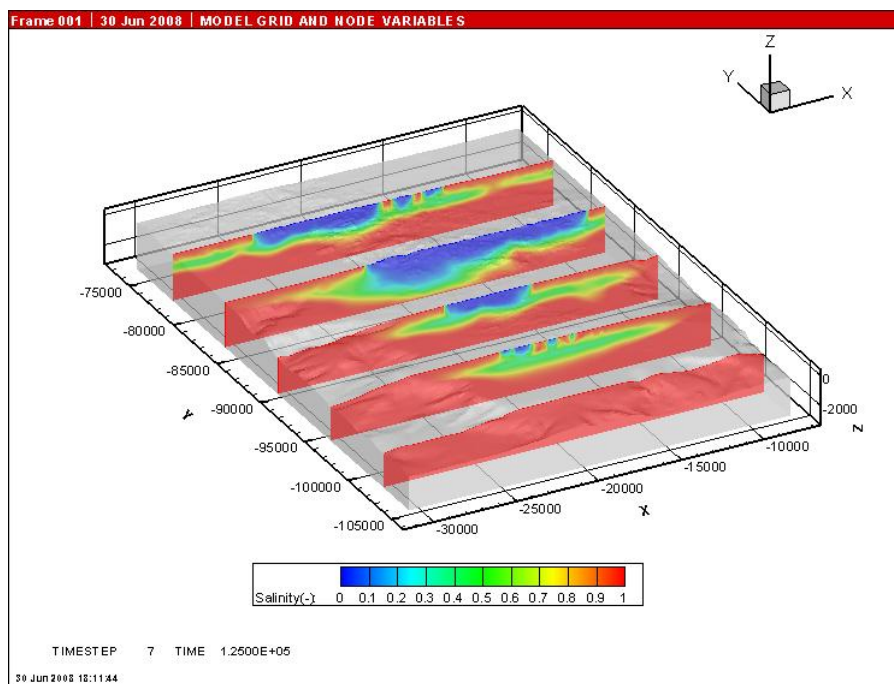


(b) 鉛直断面図

図 4.2.2-9 地下水流動解析結果-塩分濃度分布-6,500 年前（最海進時）

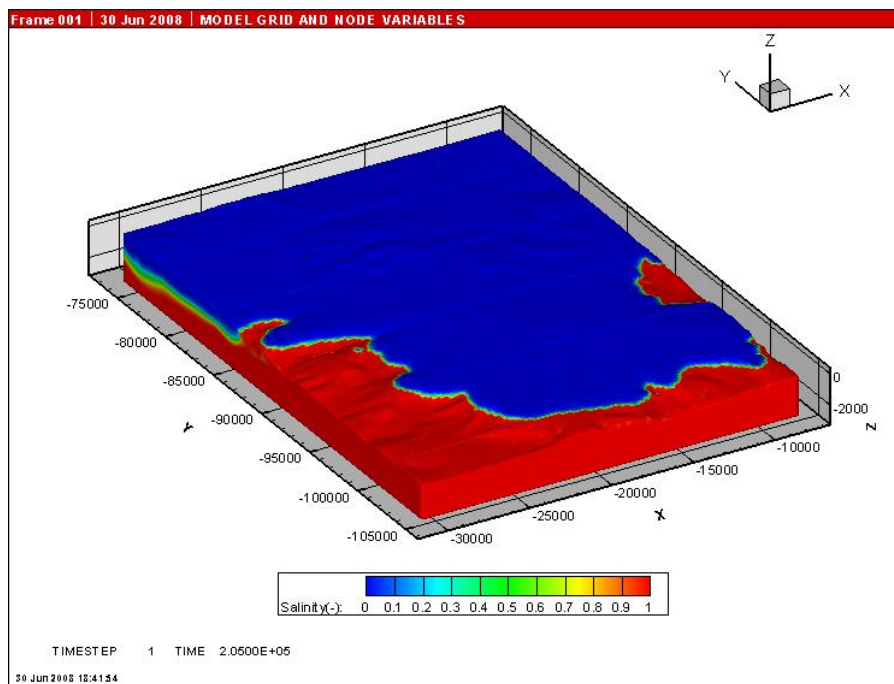


(a) 全体鳥瞰図

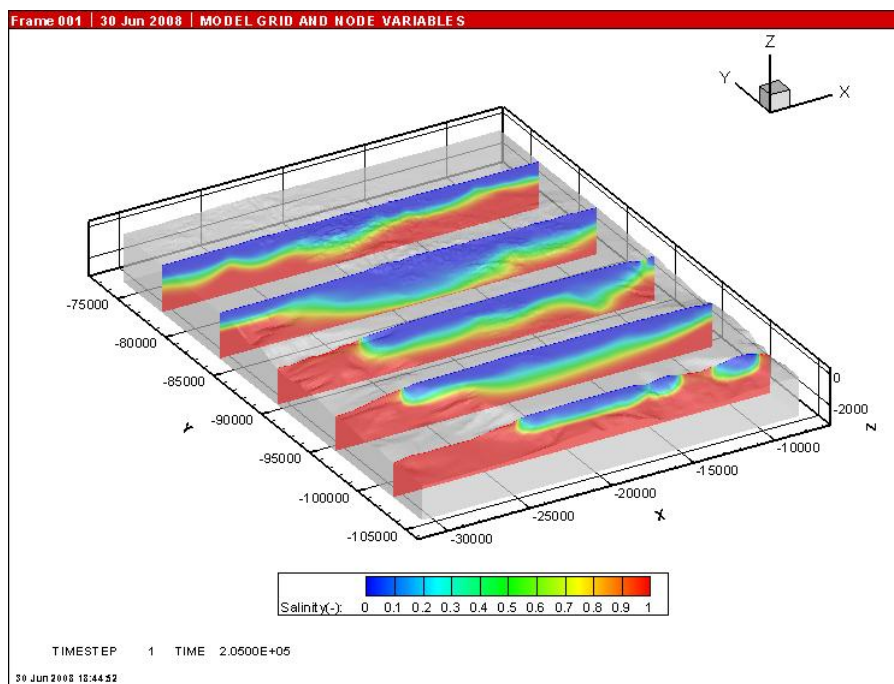


(b) 鉛直断面図

図 4.2.2-10 地下水流動解析結果-塩分濃度分布-現在

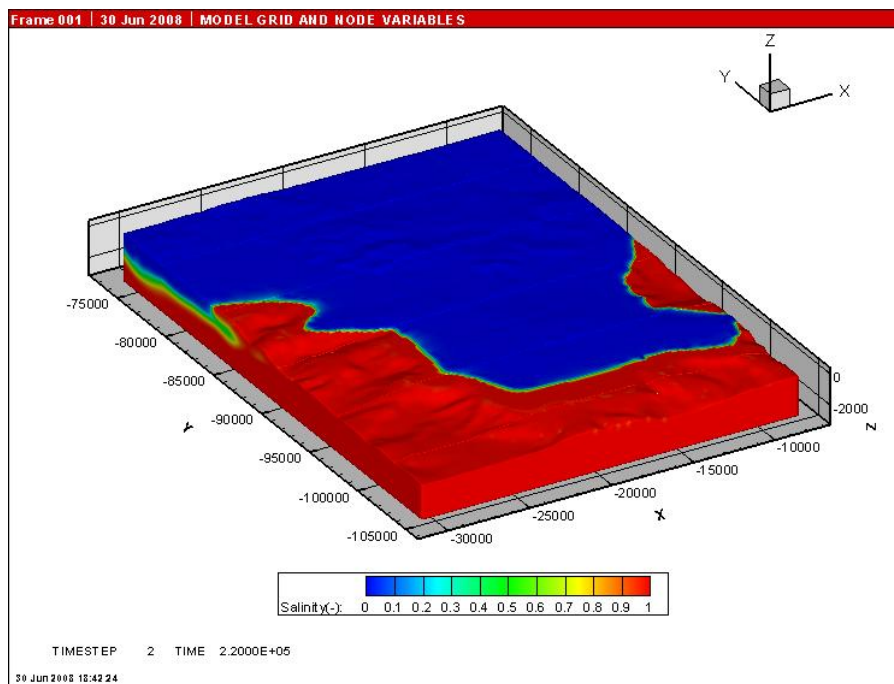


(a) 全体鳥瞰図

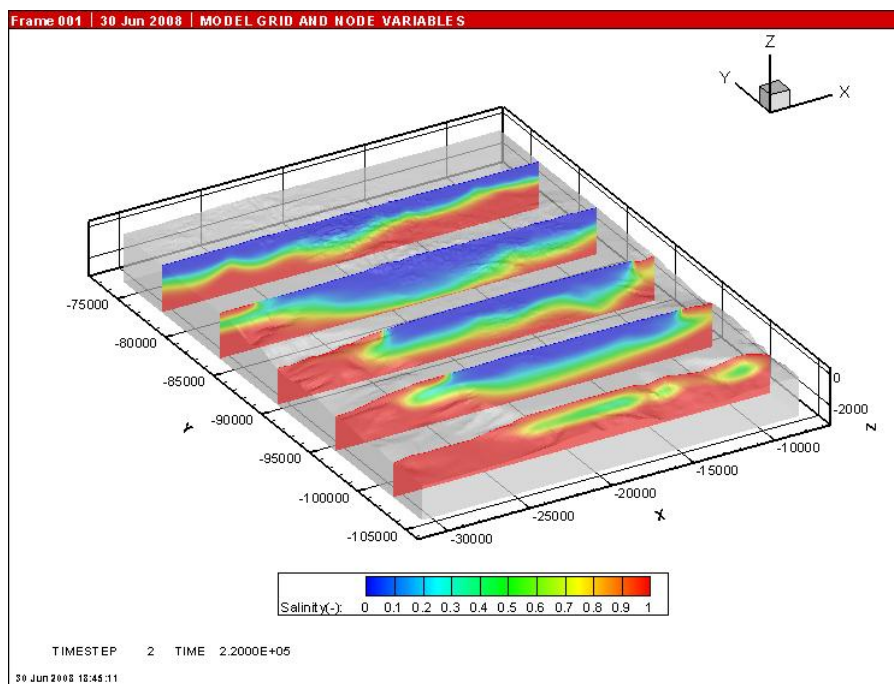


(b) 鉛直断面図

図 4.2.2-11 地下水流動解析結果-塩分濃度分布-80,000 年後（最海退時）

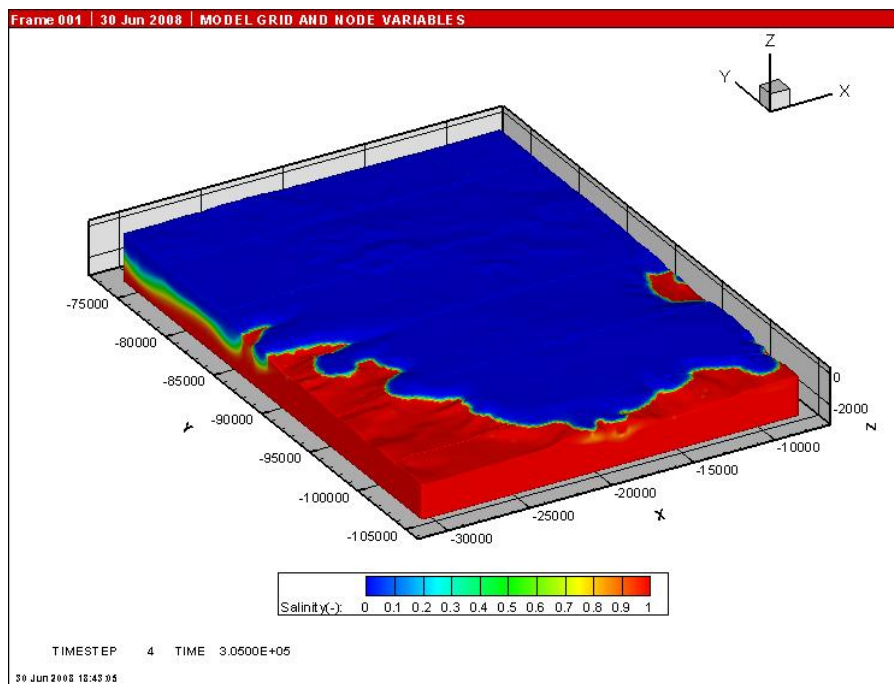


(a) 全体鳥瞰図

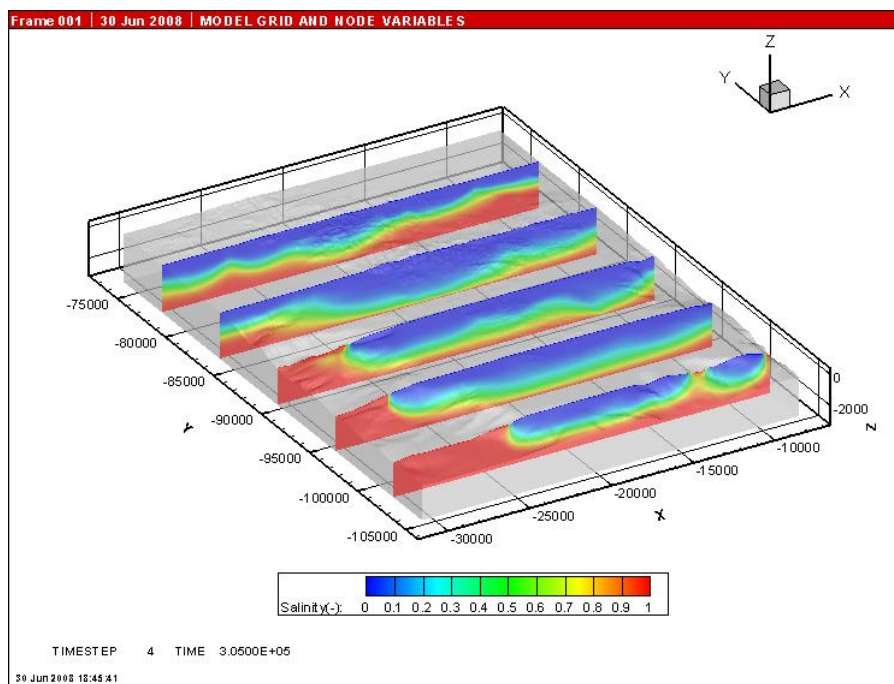


(b) 鉛直断面図

図 4.2.2-12 地下水流動解析結果-塩分濃度分布-95,000 年後（最海進時）

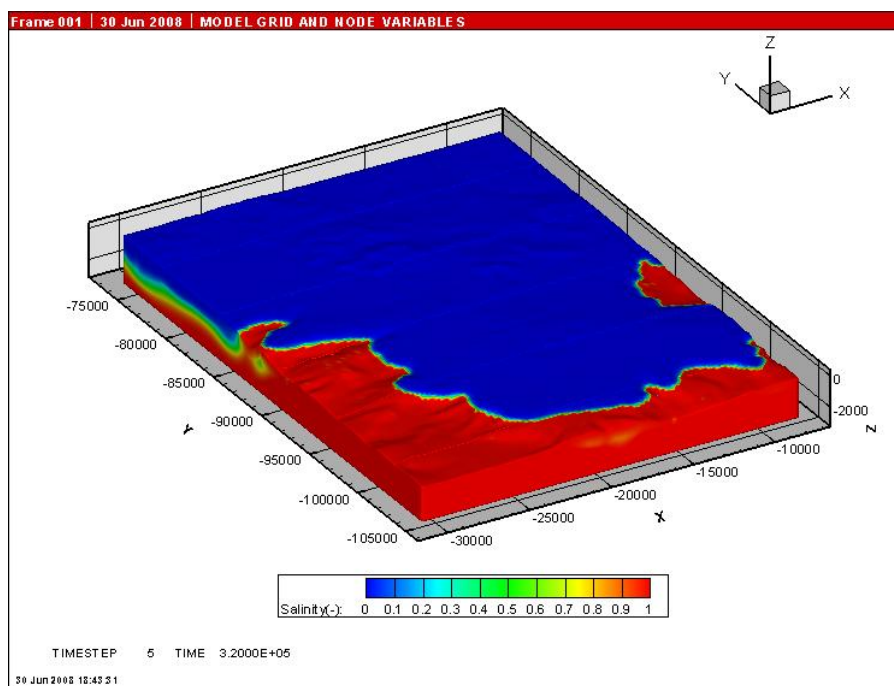


(a) 全体鳥瞰図

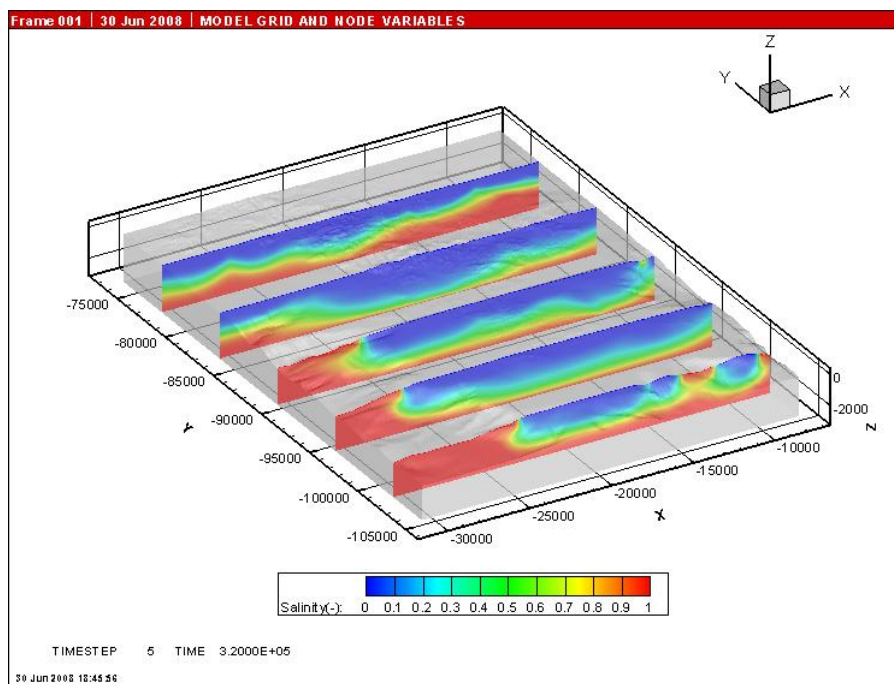


(b) 鉛直断面図

図 4.2.2-13 地下水流動解析結果-塩分濃度分布-180,000 年後（最海退時）



(a) 全体鳥瞰図



(b) 鉛直断面図

図 4.2.2-14 地下水流動解析結果-塩分濃度分布-現在から 195,000 年後（最海進時）

(6) パーティクルトラッキング法による地下水移行評価

処分場からの地下水流動によって溶解した放射性核種が地表に移行する場合、天然バリアとしての核種移行遅延機能を評価する必要がある。ここでは、前項までに示した解析モデルおよび地下水流動解析結果を用いて、天然バリア性能の評価パラメータである移行時間、移行距離および流出点を解析的に評価する。解析としては、パーティクルトラッキング法によりモデル領域内の仮想処分場領域からの粒子の移行計算を行う。計算に必要となる地下水の流速場は、前項の地下水流動解析により求めた各時間ステップの流速場（非定常流速場）を使用する。パーティクルトラッキングによる解析対象時間は、海退、海進がそれぞれ 1 回生じる現在から 95,000 年後までの期間とした。

(i) 仮想処分場の候補母岩領域の設定

仮想処分場の候補母岩領域として、三浦半島の中央部の武山断層と南下浦断層に挟まれた 3km × 3km の平面領域を選定した。当該領域に X 方向、Y 方向へ 500m 間隔で標高・400m および・500m の深度に粒子をそれぞれ配置し、合計 98 点の放出点を設定した。図 4.2.2-15 に仮想処分場の候補母岩領域および粒子のレイアウトを示す。

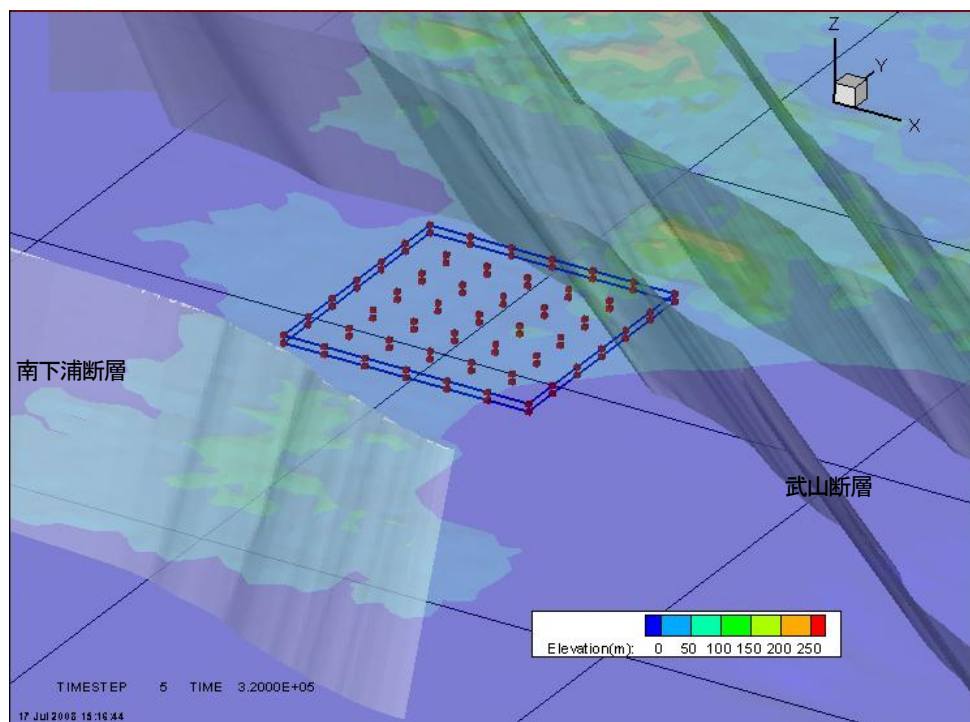


図 4.2.2-15 仮想処分場の候補母岩領域および粒子のレイアウト

(ii) 解析結果

各地点からの粒子の移行時間および移行距離を表 4.2.2-5 および図 4.2.2-16 に示す。また、粒跡線図を図 4.2.2-17～図 4.2.2-24 に示す。なお、ここで示す移行時間は、天然バリアの岩盤の有効間隙率（5%）を考慮した実流速による粒子の移行時間である。

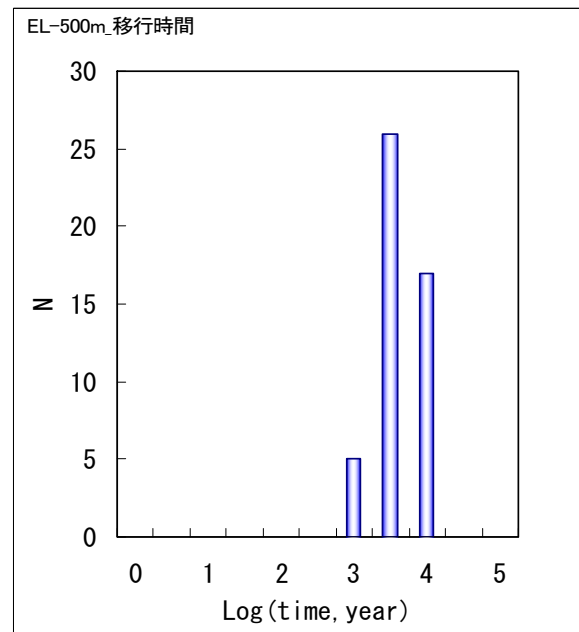
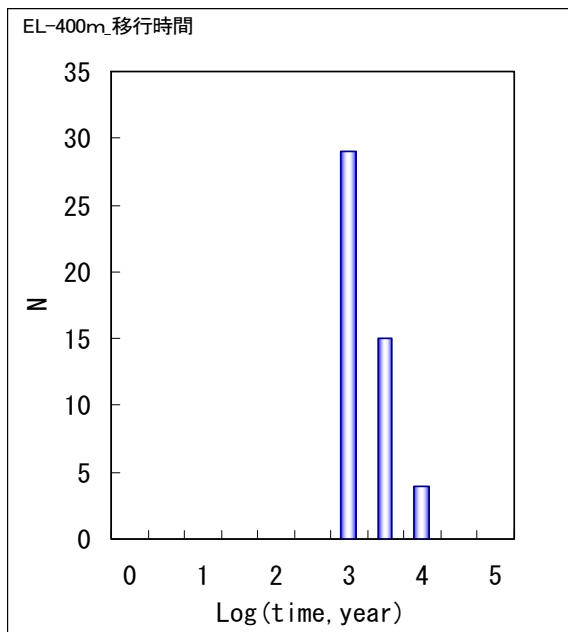
EL-500m から出発した粒子の平均移行時間は 3,365 年であり、EL-400m から出発した粒子の平均移行時間と比較すると約 2.6 倍の移行時間となる。一方、移行距離は約 1.3 倍の差に留まっている。これは、母岩の透水性に深度依存性を設定していることからより深部の透水性が小さく、相対的に長い移行時間が得られたと解釈できる。

粒子の移動方向をみると、最東端の領域から出発した粒子は半島の東側に向かい、北～西側の領域から出発した粒子は半島の西側にある湾に向かっている。また、中央～南西側の領域から出発した粒子は陸域の低地部に向かっている。

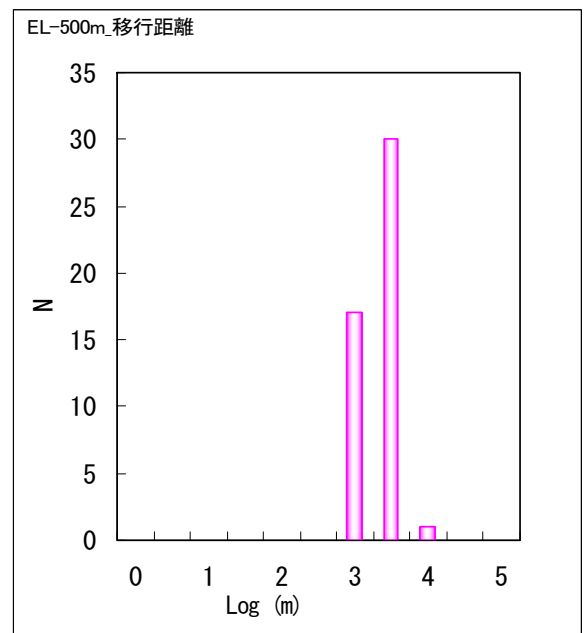
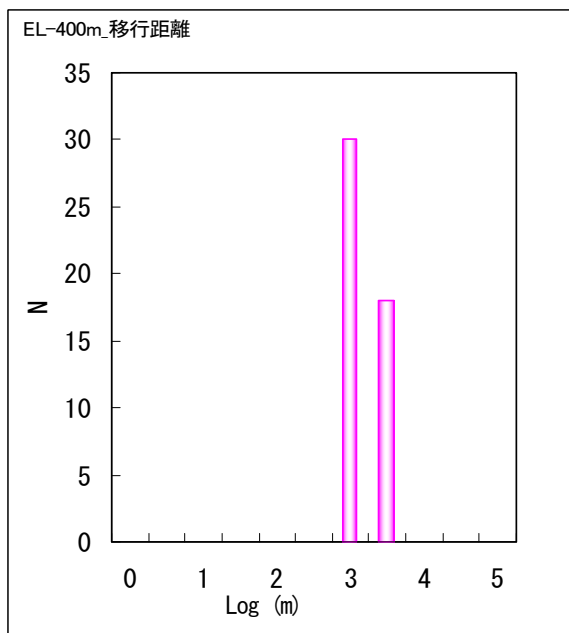
流出点の時間的・空間的な変化に着目すると、海退に伴い汀線が外側に移動することで陸域が拡大し、ほとんどの粒子は将来の陸域の低地部に流出している。また、半島の東側に流出する一部の粒子は、その粒子が流出する時間に形成される塩淡水境界の上昇流に沿って流出している。

表 4.2.2-4 粒跡線解析結果一覧

	出発点深度	平均値	最大値	最小値
移行時間(年)	EL-400m	1287	4241	374
	EL-500m	3365	9962	839
移行距離(m)	EL-400m	1026	2674	419
	EL-500m	1372	3184	551

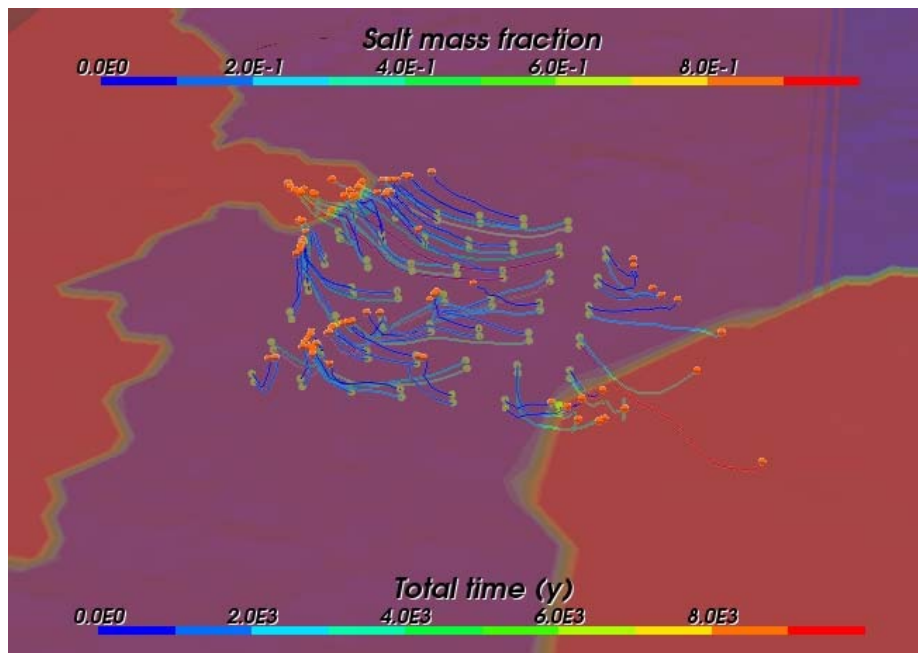


(a) 移行時間頻度分布



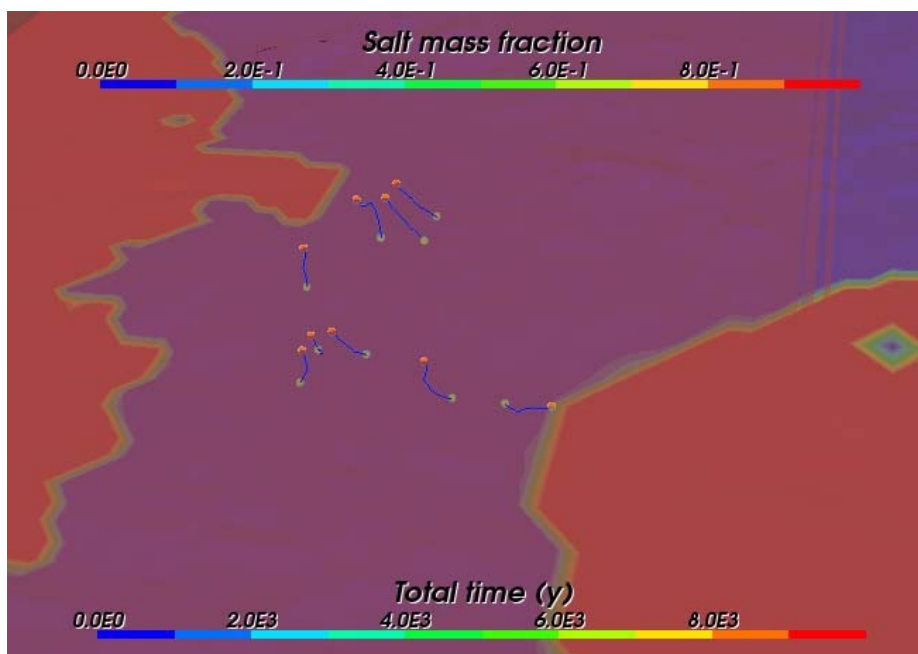
(b) 移行距離頻度分布

図 4.2.2-16 移行時間分布および移行距離の頻度分布図



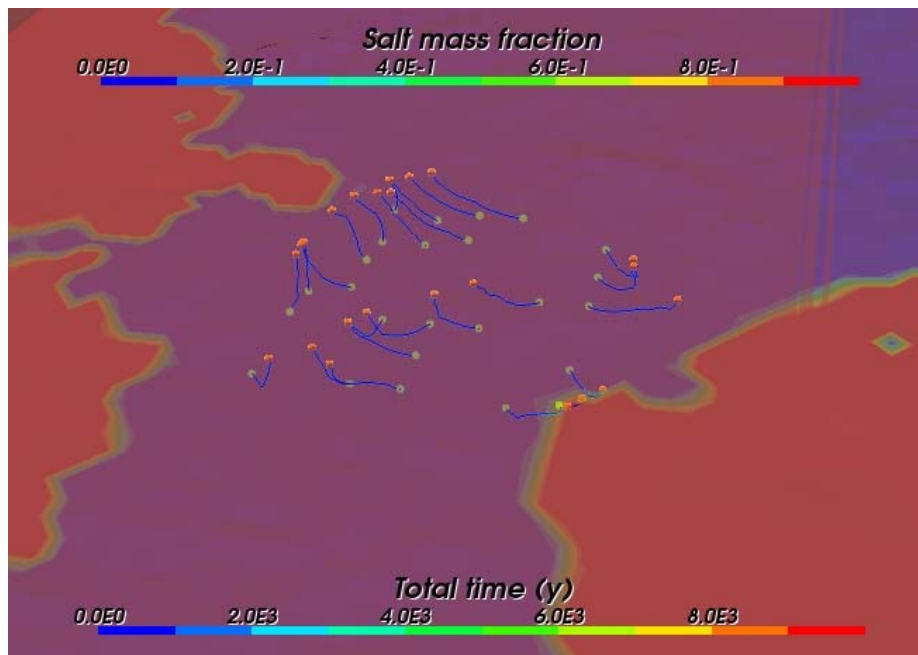
※1 黄色：出発点、橙色：流出点、粒跡線の色は流出点までの移行時間を表す
 ※2 現在の塩分濃度分布図上に表示

図 4.2.2-17 粒跡線解析結果（粒跡線全表示）



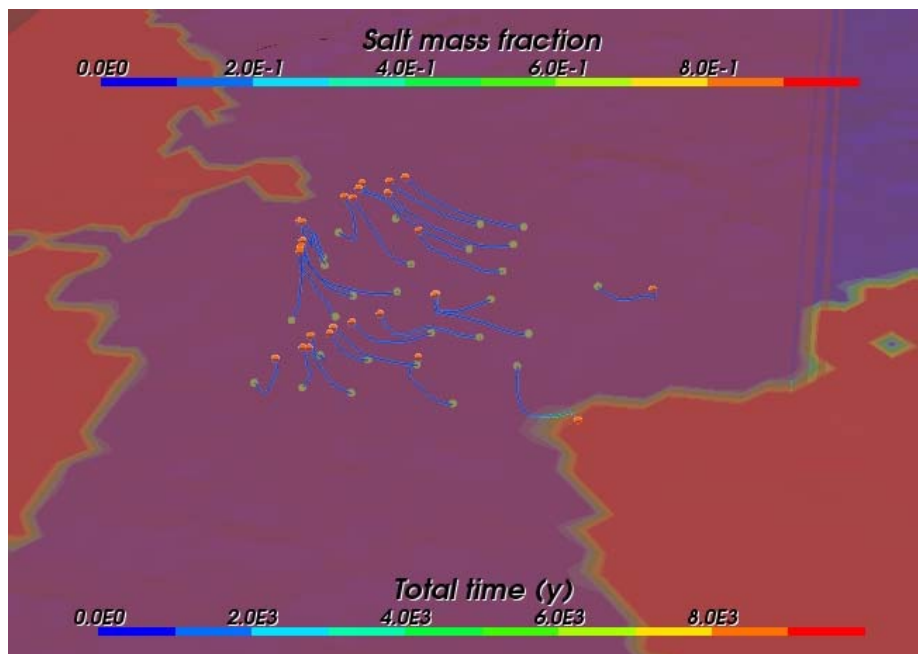
※ 500 年後の塩分濃度分布図上に表示

図 4.2.2-18 粒跡線解析結果（移行時間 0～500 年の地点）



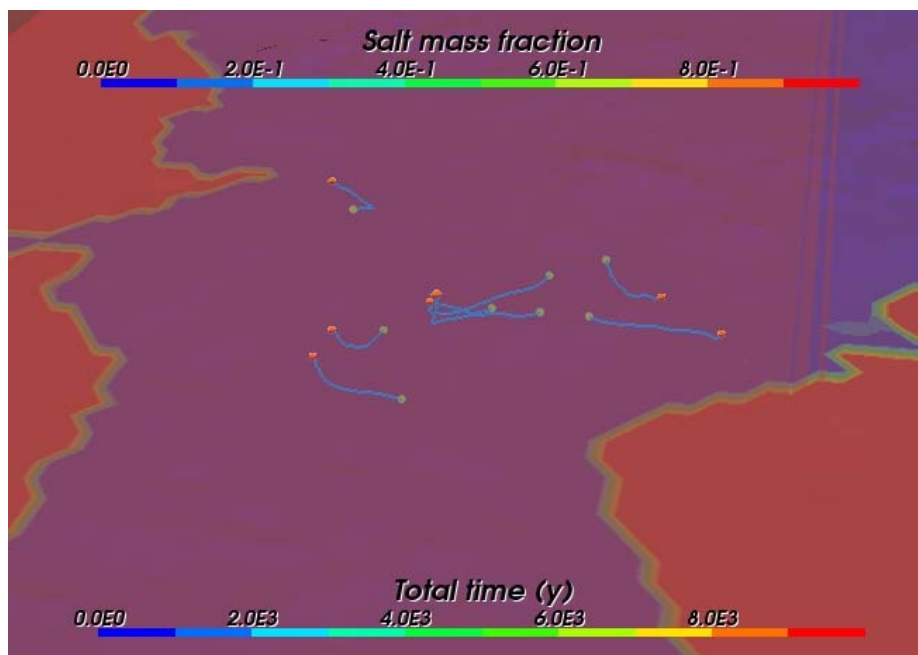
※ 1,000 年後の塩分濃度分布図上に表示

図 4.2.2-19 粒跡線解析結果 (移行時間 500~1,000 年の地点)



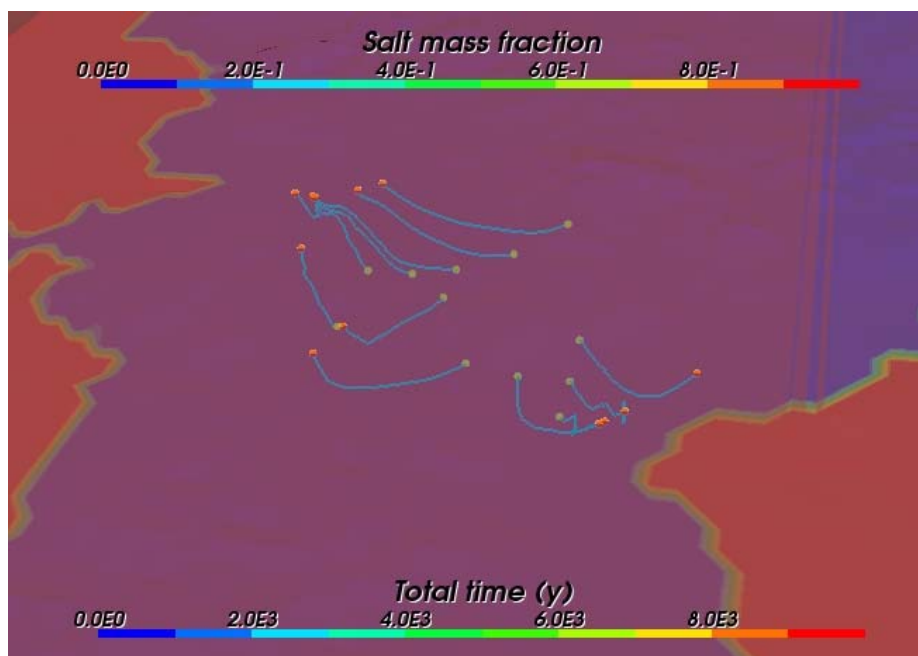
※ 2,000 年後の塩分濃度分布図上に表示

図 4.2.2-20 粒跡線解析結果 (移行時間 1,000~2,000 年の地点)



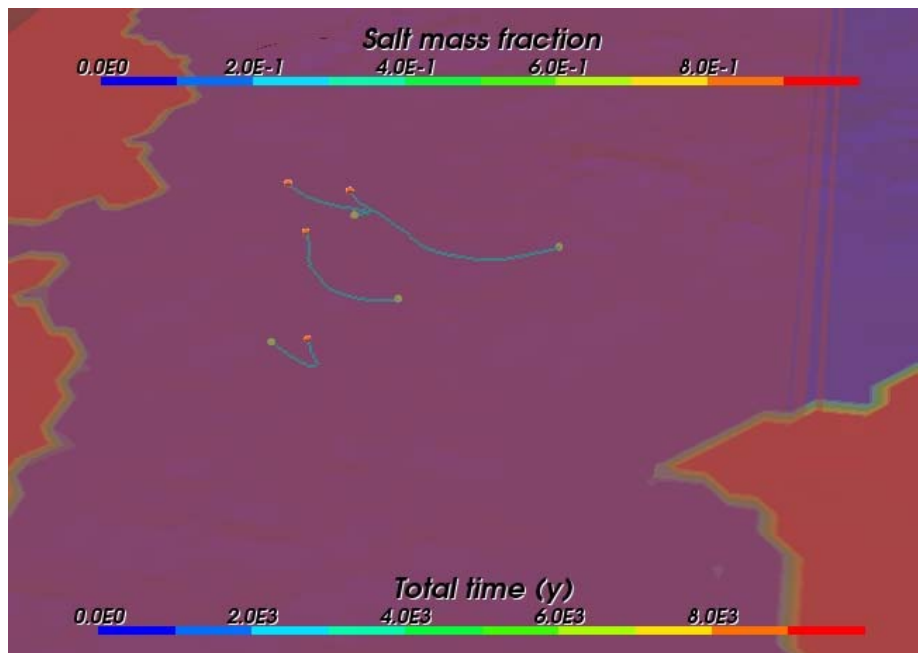
※ 3,000 年後の塩分濃度分布図上に表示

図 4.2.2-21 粒跡線解析結果（移行時間 2,000～3,000 年の地点）



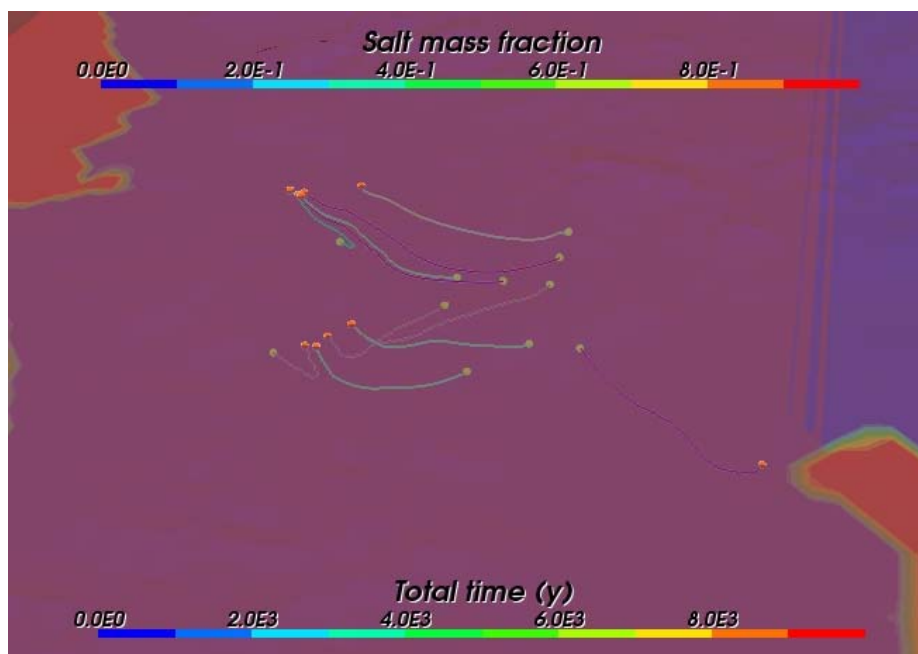
※ 4,000 年後の塩分濃度分布図上に表示

図 4.2.2-22 粒跡線解析結果（移行時間 3,000～4,000 年の地点）



※ 5,000 年後の塩分濃度分布図上に表示

図 4.2.2-23 粒跡線解析結果（移行時間 4,000～5,000 年の地点）



※ 10,000 年後の塩分濃度分布図上に表示

図 4.2.2-24 粒跡線解析結果（移行時間 5,000～10,000 年の地点）

(7) まとめと今後の展開

セーフティケースへ科学的アプローチとして、場の総合的な理解に不可欠となる地下水流動場の将来的な変動予測に関する研究成果を提示した。

地層処分セーフティケースとは、地下水流動による放射性核種の人間環境への影響を、人工バリアと天然バリアが本来的に有する核種移行を遅延させる機能であり、現状での地下水場の理解とともに将来の長期にわたる変動に関して正当性のある説明が求められる。本節で示した解析的なアプローチはその一端であり、今後のセーフティケースとしては、前述したナチュラルアナログ的なアプローチおよび調査システムフローを用いた、透明性と追跡性のある判断プロセスの統合が必要となる。

【参考文献】

- 1) 江藤哲人・矢崎清貫・ト部厚志・磯部一洋：横須賀地域の地質，地域地質研究報告（5 万分の1 地質図幅），地質調査所，1998.
- 2) 核燃料サイクル開発機構：地層処分研究開発第2次取りまとめ 一分冊1 わが国の地層環境一，JNC TN1400 99 21，1999.
- 3) 小池一之・町田 洋編：日本の海成段丘アトラス，東京大学出版会，2001.
- 4) Gelhar, L.W. : Stochastic subsurface hydrology from theory to application, Water Resources Research, Vol.22, No.9, pp135-145,1986.
- 5) Fetter, C.W. : Contaminant Hydrogeology, Prentice Hall, p83, 1999.

4.3 社会・倫理的アプローチ

放射性廃棄物処分における最も重要でかつクリティカルな課題は、地層処分の安全性を理解してもらい社会に受容れてもらうことである。近来、技術者や科学者が社会との接点を求める研究を活発に実施してきている。特に、土木工学の分野では地域とのコミュニケーションは不可欠な要素となっており、良いものを作るだけでなく、作る目的や完成後の役割などについても十分説明し、社会に受容れられなければプロジェクトは成立しないところまできている。特に高レベル放射性廃棄物の地層処分については、長期間にわたり将来世代とのかかわりもあることから、現在社会の受容がなければ前進できない事業であり、そこには発生者と受益者の立場での責任を分担するという倫理的な合意が不可欠となる (IAEA, 2007)。

本節では、社会的な受け入れを目標としたセーフティケースへのアプローチとして、以下の分野の研究成果を取りまとめている。

- ・ 制度的管理と安全レビュー
- ・ 多属性効用解析を用いた意思決定手法

4.3.1 制度的管理と安全レビュー

(1) 研究の背景：制度的管理とは

「制度的管理」に関する記述は、国際機関が規定した基準に多く、代表的な記述として、1989年 IAEA から公表された Safety Series No.99 がある。

3.1.2. Principle No.2: Independence of safety from institutional control

安全原則 2：制度的管理に依存しない安全性

The safety of a high level waste repository in the post-sealing period shall not rely on active monitoring, surveillance or other institutional controls or remedial actions after the time when the control of the repository is relinquished. (高レベル放射性廃棄物処分場の閉鎖後の安全性は、アクティブなモニタリング、監視、またはその他の制度的管理、あるいは制度的管理が終了した後の修復行為に依存してはならない)

Principle No.1 concerning the minimization of burdens on future generations also implies that these generations should not have to take any action to protect themselves from the effects of waste disposal. Records are expected to be kept and monitoring may be carried out, for instance, as required by national authorities, but the safety of the repository should not rely on these measures. (安全原則 1 で示された将来世代への負担を最小とする考え方もまた、処分場の影響から将来世代が自ら防護を必要としないことを求めている)

記述中での制度的管理は、処分場閉鎖後を対象としており、別途規定された安全原則 1 と関連

して、地層処分の将来世代へ負担をかけることのない安全確保策を求めている。

1990年にIAEAから出版された‘Working Material, Radioactive Waste Management: An IAEA Source Book’では、‘Post closure aspects and institutional control’と題して、閉鎖後の制度的管理のあり方とその限界について具体的に記述されている。IAEAでは、制度的管理について、地表付近の低レベル廃棄物処分から、深地層での処分までを議論しており、このSource Bookは当時の国際レベルでの議論をまとめた資料として貴重である。特筆すべき点として、「なぜ制度的管理が必要とされるか」に対する基本的考え方を示している。また、このような制度的管理は、誰が責任を持って実施すべきかについての考えも示唆している。資料中では、制度的管理は、地層処分が本来有する安全性を担保する行為から切り離して、規制当局あるいは地域住民の要求に対応して実施する可能性が高いとし、責任主体は、管理の性格上、処分の実施主体から国に移行することが望ましいとした。

地層処分を計画する世界各国は、基本的にはSafety Series No.99をベースに制度的管理の役割を捉えていると言えよう。

一方、制度的管理を将来世代への責任を削減するために行う、という倫理的な側面で捉え、その必要性和限界を論じている記述がある。1994年に公表された‘Environmental and ethical aspects of long-lived radioactive waste disposal, IAEA’では、コンセンサスが得られた事項として以下の結論を提示した。

将来世代への負担を最小とするということは、将来の安全性だけでなく、将来世代の管理の責任も視野に入れており、従って、制度的管理に依存しないパッシブ・セーフティによる地層処分の安全概念が正当化される。結論中にはこのような倫理的な原則と「Retrievability: 回収可能性」が言及されている。また、地層処分の制度的管理のあり方と科学・技術的には直接関係しないが、将来世代への負担と自由な意思決定を尊重するという世代間の公平さから、制度的管理の一環として回収可能性が論じられているようである。この議論は別途後の節で記述する。

制度的管理の必要性和適用の限界について、明確に議論されているのが、1995年米国科学アカデミー（NAS）が公表した‘Technical Bases for Yucca Mountain Standards’である。この基準は1990年に科学アカデミーが、硬直したユッカマウンテン計画への勧告として公表した‘Rethinking’に端を発し、ユッカマウンテンにおける高レベル放射性廃棄物処分に関する技

術的拠り所となる考え方を示したものである。

基準の中で制度的管理に関しては、人間侵入と制度的管理と題して、特に処分場への人間侵入をどのように評価するか、またその対応策はあるのか、といった連邦議会が表明した質問に科学・技術的な回答が可能であるかという観点から制度的管理のあり方を論じている。

Energy policy Act of 1992 における連邦議会の質問事項

Question 2. Whether it is reasonable to assume that a system for post-closure oversight of the repository can be developed, based on active institutional controls, that will prevent an unreasonable risk of breaching the repository's engineered barriers or increasing the exposure of individual members of the public to radiation beyond allowable limits.

Question 3. Whether it is reasonable to make scientifically supportable predictions of the probability that a repository's engineered or geologic barriers will be breached as a result of human intrusion over a period of 10,000 years.

NAS の見解は、いずれの質問に対しても、科学・技術的に妥当な回答を準備することは不可能であること、制度的管理によるモニタリング、監視、修復等のアクティブな管理、土地利用制限、マーカーの設置、記録の保存等のパッシブな管理はいずれも、遠い将来の人間侵入の可能性を削減できるとする根拠は得られないこと、また、遠い将来の人間侵入の発生確率を科学的な根拠のもとに推測することも不可能であると示唆した。

人間侵入の問題について、NAS は本基準で明確に扱いを示唆しているが、以下では、制度的管理の役割について記述されている事項を抜粋して記述する。

Based on these findings, we make two observations about how to deal with human intrusion in the Yucca Mountain standards. First, although there is no scientific basis for judging whether active institutional controls can prevent an unreasonable risk from human intrusion, we think that if the repository is built such controls and other activities can be helpful in reducing the risk of intrusion, at least for some initial period of time after a repository is closed. Therefore, although it cannot be proven, we believe that if a repository is built at Yucca Mountain, a collection of prescriptive requirements, including active institutional controls, record-keeping, and passive barriers and markers, will help to reduce the risk of human intrusion at least in the near term. The degree of benefit is likely to decrease over time. Further, once other knowledge of the repository is lost, passive markers could attract the curious and actually increase the risk of intrusion. Nonetheless, we conclude that the benefits of passive markers outweigh their disadvantages, at least in the near term.

すなわち、長期的な観点から、いかなる制度的管理も継続性を保証することは難しく、人間侵

入のリスクに対しては無力である。しかしながら、短期間をみれば、土地利用制限等の制度的管理はリスクを削減する有効な手段として機能すると判断している。

1995年にIAEAがRADWASS (Radioactive Waste Safety Standards) プログラムの活動の一環として公表した ‘Safety Series No.111-F The Principles of Radioactive Waste Management’ における制度的管理の記述を紹介する。このドキュメントで、制度的管理は以下のように定義されている。

Institutional control. Control of a waste site (for example, disposal site) by an authority or institution designated under the laws of a country or state. This control may be active (monitoring, surveillance, remedial work) or passive (land use control) and may be a factor in the design of a nuclear facility (for example, near surface disposal facility).

本文中での制度的管理に関する記述は、安全原則5：将来世代への負担に関する解釈文の中に見つけることができる。

320. The management of radioactive waste should, to the extent possible, not rely on long term institutional arrangements or actions as a necessary safety feature, although future generations may decide to utilize such arrangements, for example to monitor radioactive waste repositories or retrieve radioactive waste after closure has been effected. The identity, location and inventory of a radioactive waste disposal facility should be appropriately recorded and the records maintained.

注意すべきことは、1989年の ‘Safety Series No.99’ が高レベル放射性廃棄物等の地層処分を対象としたのに対し、111-F では全ての放射性廃棄物を対象としていることから、低レベル処分で実施されている、モニタリングによる制度的管理の実態を意識した記述になっている点である。地表近辺に処分される低レベル放射性廃棄物では、廃棄物が人間に与える影響が基準以下になるまで段階的な制度的管理を行うことで安全性が担保される方策を採用している国が多い、フランス、英国、日本、米国などである。

(2) 地層処分における制度的管理の基本的考え方

地層処分が目標とする安全確保の理念（パッシブ・セーフティ）と人間が関与する安全のための管理とのつながりを具現化することが、処分場の管理のあり方を形作ることになる。つまり制度的管理とは、人間とその環境から廃棄物を安全に隔離し、人間の関与を必要としない状態にす

るための仕組みとは何かという命題に対する回答を準備することである。この考え方は、前章で考察した統合化されたセーフティケースが目指すものときわめて類似するものである。

まず、安全性に対して人間の関与を必要としない段階までを想定すると、大きく以下の3段階に分類できる。

- ・ 処分予定地での調査・評価から、建設、操業段階を経て地下空洞が埋め戻され、施設が閉鎖されるまでの段階（閉鎖前の段階）
- ・ 施設が閉鎖され、処分場周辺の環境がもとの状態に回復することを確認した上で処分事業を停止するまでの段階（閉鎖後処分事業廃止までの段階）
- ・ 処分の安全性に関わる人間の関与を必要としない段階。但しこの段階では、地元からの要請で何らかの安全確認のための監視・モニタリングが継続される場合もある。

このような段階を想定すると、管理には、施設の閉鎖に至るまでの段階と閉鎖後の段階に大きく分類される。

① 施設閉鎖までの管理のあり方

施設閉鎖までの管理のあり方を検討する上での懸案事項は、どのような管理を何の目的で実施し、何に反映するのかという命題である。これまでの検討から、管理の目標は「埋設した放射性廃棄物について、人間が管理しなくても安全を確保できる状態となっていることを実際に確認すること」である。この場合、重要な要素の一つとして、確認する側とその情報をベースに人間の関与から離すことを了承する側という、様々な意思決定者の存在がある。例えば、処分施設の閉鎖までに必要な情報とその対象については、図 4.3.1-1 の関連が想定できる。この図では、関連する様々な意思決定者（ステークホルダー）に対して、実施主体が人間の管理を必要としない処分に移行するため、異なる種類の情報を準備しなければならないことを示している。その情報には、科学・技術的な情報だけでなく、倫理的な側面を含む社会的な受容を考慮することが不可欠となる。

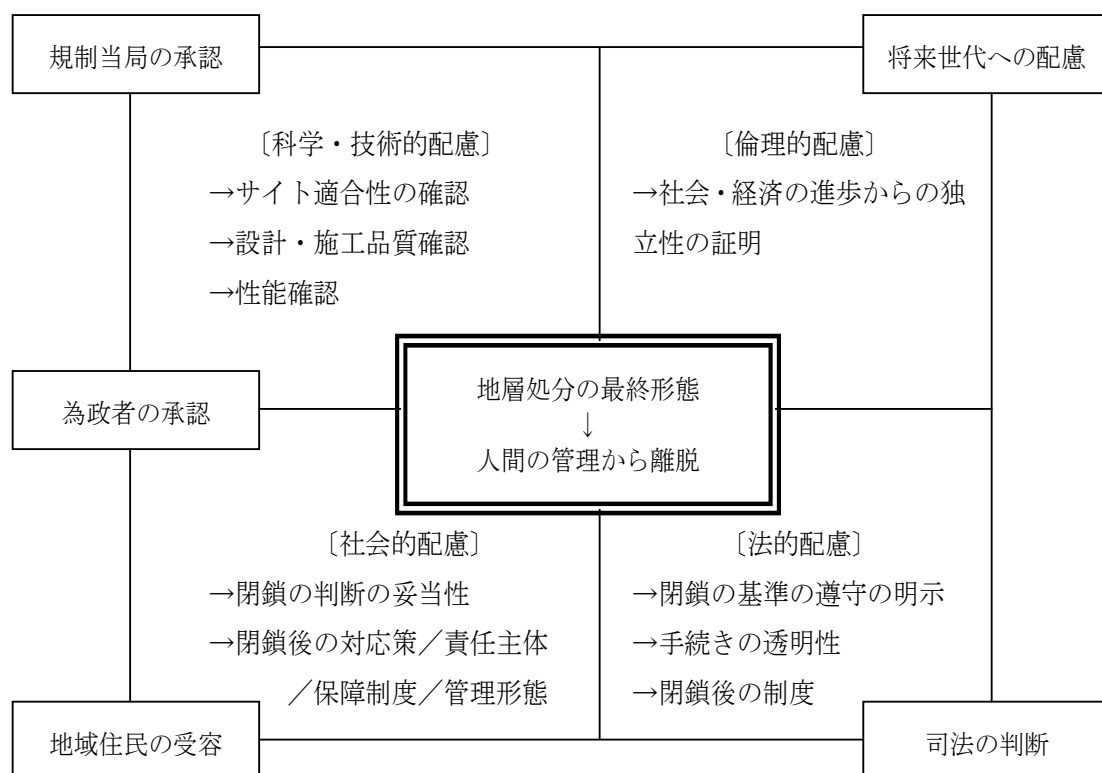


図 4.3.1-1 地層処分に至る意思決定とステークホルダーの関係 (Kawamura et al., 2005)

②施設閉鎖後の管理のあり方

本項で述べる管理は、処分事業を停止するのに必要な情報を得ることを目標とした行為と定義する。前段階で処分の安全性は人間の関与から処分システム本来の特性に委ねられており、処分システムの周辺環境が、処分事業が始まる以前の状態に回復していることを確認するための行為を閉鎖後管理として位置づける。現時点での考察として、処分予定地での調査段階から施設の閉鎖段階にわたる、処分場周辺に配置したボーリング孔を利用した地質環境モニタリングの展開が想定できる。そのモニタリングを施設閉鎖後も継続して実施し、地下水位、間隙水圧、水質等、地質環境の回復を確認する行為が管理の一部となる。これらのモニタリングは、処分の安全性を直接監視するものではなく、処分という事業が周辺環境に与えた影響の回復を監視する目的で実施される性格のものである。また、処分場周辺の水質の測定、環境放射線モニタリングも継続して実施され、事業が停止されるまでは、処分エリアへの人間の活動が及ぶことを監視する制度も管理の一部として導入される。さらに最終的な事業停止にあたっては、関連文書の保管システムの構築、処分場が存在することを示す記録、目印等が準備され、これらの管理が実施主体から国あるいは地域の住民に移管されることで事業としての役割は終了することになると想定している。

事業停止後は、土地利用制限、記録の保存等の制度は継続して実施される。これらの法的に定

められた事項は、廃止が承認されるまで存続する。また、地域住民等が要望すれば、事業停止まで実施されていた周辺環境モニタリングも継続して実施することは可能である。これらのモニタリングは、安心感を醸成するためのコンフィデンス・ビルディングと位置づけることができる。

(3) わが国での「処分場の管理」

処分の管理のあり方を基本として、わが国で想定されている処分スケジュールに対応した処分場の管理について考察する。処分システムの特長から、処分場の管理を以下のように定義する (Kawamura et al, 2006)。

最終的に人間とその環境から放射性廃棄物を安全に隔離できることを確信し、人間の関与を必要としない処分（パッシブ・セーフティ）とするために、予定地での調査から段階的に安全確保の方策の妥当性を科学・技術的に確認し、ステークホルダーの受容を得る行為

このような段階的な確認行為は、処分の実現に向けての確信を構築する行為として位置付けられる。セーフティケースの構築の中で、われわれが関与できる範囲での行為として、

- ・ サイト選定における調査と評価および適合性の判断
- ・ 廃棄物の特性とサイトの特性に対応した処分場と人工バリアの設計とその妥当性確認
- ・ 処分システムの性能評価による安全性の確認

がある。これらの行為には、直接的に処分予定地で実施されるもの、処分技術の実証として実施されるもの、処分場の建設・操業・閉鎖の行為を通じて確認されるもの等があり、一方性能評価のように、予測結果の信憑性がシナリオ、モデル、データの信頼性の確認により行われるという間接的な行為に依存するものもある。

以上の人間が関与する行為を処分のスケジュールに対応させ、地質環境の確認、妥当性の実証、処分場および人工バリアの品質確認、処分システムの性能確認として段階的に展開する計画を構築したのが図 4.3.1-2 である。段階的な制度的管理として、事業停止に向けて科学・技術的な情報を収集し、安全評価等のレビューを行う行為、社会的な受容獲得のための情報を準備する行為が想定される。いずれも「処分場の閉鎖：パッシブ・セーフティ」に移行するための意思決定に用いられる情報として位置づけられる。

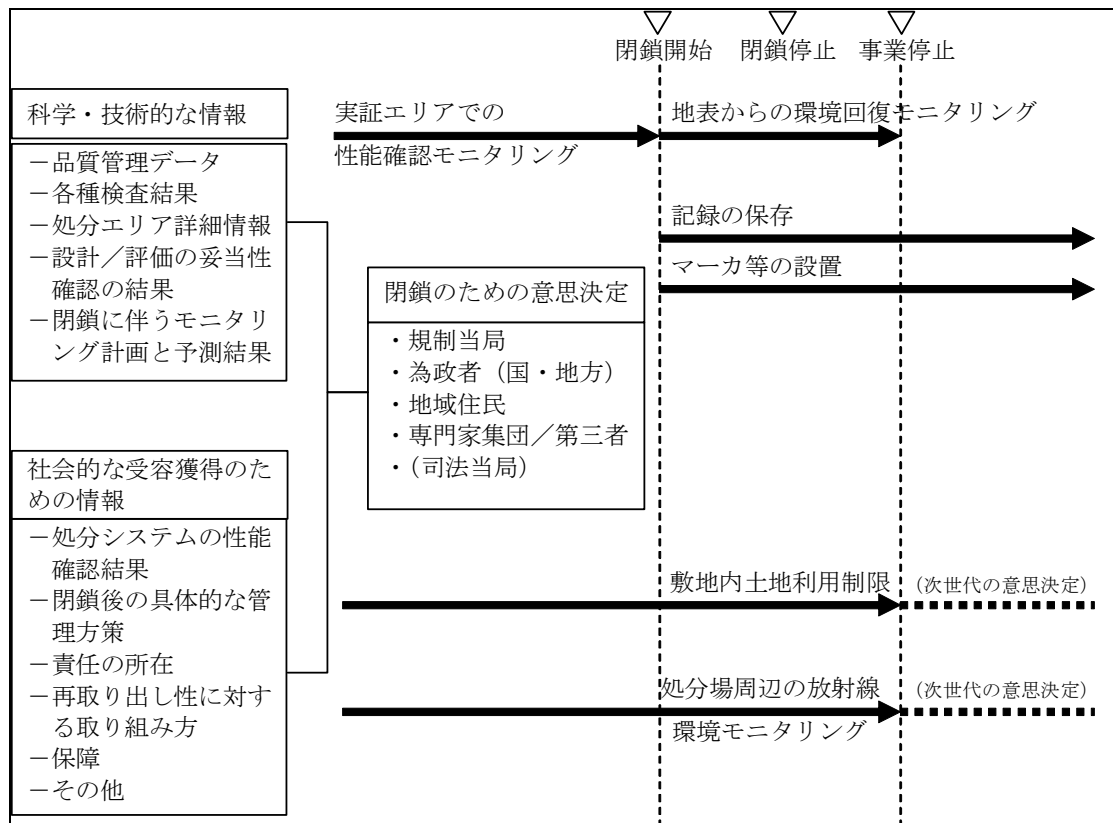


図 4.3.1-2 事業停止に至るまでの段階的な制度的管理 (Kawamura, et al., 2006)

(i) 処分施設の閉鎖に至るまでの管理

a. サイト特性調査・処分技術の実証段階

調査・実証段階においては、科学・技術的に許認可取得を目標とし、さまざまな地質環境特性データが地表および、地下の調査施設の建設を通じて収集される。これらの行為は、別途策定される規制主体等の調査手法、データの管理に関する品質保証規定に従い展開される。サイトにおける様々な情報は、サイトが処分地として適格性を判断するためのデータとして取得され、処分場と人工バリアの設計、施工計画、処分技術・手法の実証、処分システムの性能評価等に反映されることから、データの品質管理は極めて重要となる。

また、実証エリアで展開される処分技術の実証行為は、実際の仕様に基づく例えば、パイロット処分に相当し、その成果は、許認可取得のための設計手法の妥当性、性能評価に用いられる各種モデル、計算コードの適用性評価等に用いられる。さらに、実証段階を通じて適用された建設工法、実績は実際の処分エリアの建設に直接応用されるとともに、技術の実証で得られた計測データ、検査結果、品質の分析結果は、許認可取得後の建設、操業等の人間が直接関与する行為の品質基準を策定する基本情報となる。

したがって、地下調査施設で展開されるサイト特性調査、実証エリアでの各種実証試験は、処分場の管理のための基盤となる情報を提供する極めて重要な活動と位置付けられ、またこの段階で確立される各種技術、および品質管理の手法は、実際の処分に向けてのコンフィデンス・ビルディングにつながる行為となる。

b. 処分場建設段階

処分場の建設段階での管理は、前項の実証段階で得られた施工方法と品質確認の情報をベースに構築された品質管理規定に従い、それぞれの用途に対応した空洞の建設と安定性確保のための方策が確認検査とともに順次展開される。空洞の完成検査では、内空検査（寸法）、岩盤の強度特性試験、支保を設置した部位の応力・歪み測定、地下水の空洞内への浸透水量、割れ目の分布・走行など設計のパラメータとして使用するデータ、および性能評価のモデル、解析コードに使用するデータの確認が建設作業と平行して実施される。

特に廃棄体、人工バリアを設置する処分ピット、処分坑道等の空洞の出来型検査は、所定の仕様に仕上がっていることの他に、人工バリアを設置する環境として別途規定された品質が保証されているかの確認が詳細に実施される。一連のデータは、廃棄体の定置位置毎に取得され、別途規定される品質保証のプログラムに対応した形で総合的に判定され、品質確認データとして判定結果とともに記録保存されることになる。

c. 処分場操業段階

処分場操業段階における管理の対象は、実証エリアでの確認結果をベースに構築された品質管理基準に従い、所定の位置に廃棄体と人工バリア材を設置する行為、処分坑道を埋戻す行為が中心となる。操業段階での品質管理項目としては、

- ・ 廃棄体を定置する位置の空洞の状況確認：浸透水量、内空変位、破損等
- ・ 廃棄体を定置する位置の確認：配置ピッチ、座標
- ・ 人工バリアの設置確認／検査：材料・製品確認、設置位置確認等
- ・ 埋戻しの品質管理：材料、締固め度、埋戻し後の品質

等が想定される。人工バリアの品質管理においては、地表等定置以外のスペースで品質確認がなされるオーバーパックの場合、廃棄体とバリア材が一体としてプレファブリックされてくる場合（前章で紹介した PEM 等）、および原位置で人工バリアが構築される場合では、それぞれの品質確認の手順と確認項目が異なる。特に定置位置の狭い空間での品質確認方法については、事前に

実証エリア等での十分な準備が不可欠となる。

操業中の放射線モニタリングは、通常の原子力施設に用いられている管理区域内での放射線管理システムの導入が想定される。ただし、地下水の処理については、これまでの原子力施設では想定していない状況となるため、管理下での独立したドレーンシステムの設置と排水モニタリングが必要となる。

処分場の建設段階から操業段階に至る期間、実証エリアでは、許認可取得までに実施されたパイロット処分とも呼ばれるデモンストレーションが一部継続され、挙動が性能確認モニタリングとして展開されるとともに、段階的な実施の安全確認が展開される。操業段階での管理は、処分施設の閉鎖に向けてさまざまな意思決定者、特に為政者と地域住民の理解を得るために、処分が問題なく実施されていることを明示する目的で実施されるコンフィデンス・ビルディングとともに、安全レビューへのインプット情報を収集する場としての役割を担う。

その後、処分エリアでの操業における品質管理のデータと、実証エリアでの処分システムの性能確認データを総合し、主要坑道およびアクセス坑道等地下への空洞を埋戻す承認を得るための活動が開始される。前章で記載したように、閉鎖に向けての意思決定においては、科学・技術的に準備される情報の他に、広く受容を得るための情報の準備が不可欠となる。そのためには、処分エリア、実証エリアでの確認データの取得だけでなく、調査段階でのデータ、室内試験等の結果、各段階での専門家のレビュー結果、品質保証プログラムの遵守の情報、および閉鎖に至るまで長期の安全性に関わる情報等を準備しておかねばならない。したがって、閉鎖に至るまでの管理では、予定地でのサイト特性調査の段階からのプログラム開始が必須となる。

d. 処分場閉鎖前段階

閉鎖前段階での管理は、閉鎖に至るステークホルダーに提出する閉鎖後の管理計画も踏まえて実施される。特に、主要坑道、アクセス坑道埋戻しを含む閉鎖の行為において、処分システムに悪影響を及ぼさない構造、建設手法、および材料であることが、閉鎖行為が始まる前に確認されなければならない（閉鎖措置計画：修正「最終処分法」で規定、2007）。またプラグ等長期の安全性に直接関連する人工物がある場合、性能に関する事前の確認と了承を得ておくこと、また施工にあたっての品質管理基準が実証エリア等での確認を経て規定されていることが不可欠となる。

閉鎖の行為に至るまで、処分エリアでは地層内の特性を確認するモニタリングが継続されており、これらのデータを用いて、許認可申請時に提出した安全評価の見直す行為が必要となる。こ

の行為は、原子力安全委員会が 2007 年に公表した「安全確保の基本的考え方」では「安全レビュー」と規定された。

安全レビューの内容については、現在原子力保安院を中心に議論が進められており、わが国で最初の地中処分となる、余裕深度処分への適用が想定されている。安全レビューの結果とともに提出される閉鎖措置計画に従い、国の確認を得た後、処分場の閉鎖行為が実施される。閉鎖行為に伴って、処分事業の停止に向け、適切な位置での環境変化のモニタリングが開始される。モニタリングの主目的は、処分場の建設によって影響を受けた特性が、埋戻し、閉鎖に伴いどの様に回復していくかを直接確認することにある。また、社会的な受容を考慮し、処分場周辺のボーリング孔を用いて環境の変化あるいは放射能モニタリングが継続して実施される。これらのモニタリングは、処分場を埋戻し閉鎖し、人間の関与を必要としない安全な状態へ移管するにあたり、様々なステークホルダーの受容を得るために行われる最終的な管理段階に継続される。

(ii) 処分事業の停止に至るまでの管理

処分事業の停止に至るまでの管理では、処分事業開始時点で実施された管理、例えば、敷地内への立ち入り制限と土地利用制限等のパッシブな管理の他に、敷地境界での放射線モニタリング、地表水の各種モニタリング等が、閉鎖行為終了後も継続して実施される。管理の主目的は、放射性廃棄物が環境に与える影響の監視ではなく、調査、建設、操業、閉鎖等一連の処分行為が周辺環境に与えてきた影響の回復状況を確認するために実施される。

閉鎖中にアクセス坑道周辺を中心に展開される環境回復モニタリングでは、処分エリアに影響を及ぼさないよう考慮して、回復現象が検知できる位置を中心にモニタリングポイントが設計される。モニタリングでは、地下水位、間隙水圧、水質等が初期のアクセス坑道建設前段階での調査で取得されたデータと比較して、一連の処分行為を通じてどのように変化してきたか、また初期の状態に回復していくかについて、事前の予測解析結果を参照し、データを直接確認する。モニタリングの期間は、サイトの地質環境条件、建設、埋戻し、閉鎖の工法によって異なるが、十分長い期間を設定すれば、特に水理環境は元の状態に戻っていくと考えられる。この回復現象は、科学・技術的に予測することが可能で、回復傾向にあることを確認した段階で処分事業を停止するという一つのシナリオが設定できる。

この段階での管理には、敷地内への立ち入りの制限、敷地境界での環境モニタリング、地表水での水質検査などのアクティブな制度的管理と、マーカー等の設置、モニュメントの構築、処分に関わる全ての記録の保存およびその管理システム構築といったパッシブな制度的管理が前段階

から継続して実施される。この内、アクティブな管理については、環境回復モニタリング期間をベースに実施主体と事業停止後の責任主体、および、地元住民との協議でその期間が決定される。いずれにしてもこれらの管理は処分システムの安全性に直接関係する行為ではなく、人間の関与から離脱するために展開されるプロセスの一部として位置づけられる。

(iii) 処分事業停止後の管理

事業停止後の管理については、実施主体から何らかの形で最終責任が移管された主体と地元住民（自治体）との協議によって決定される事項と想定した。われわれの世代は、地層処分システムという人間の関与を必要としない処分方策を選択し、段階的にその妥当性の確認と受容を得る活動を管理として展開し、最終的に人間が関与する管理を必要としない状況確立していくことを目標としている。これ以降の管理については、科学・技術的には安全性に直接関係しないが、安心感を醸成するために何らかの監視を継続する意味で、例えば地表水、空気中の環境放射線モニタリングの継続が考えられる。

また、土地利用制限、立ち入りの禁止、記録の保存等を定めた法律による管理は、廃止されない限り永久に存続する性格を有するため、上記のモニタリングを含めて、事業停止後の管理継続については、その時点での意思決定者に委ねる事項と考える。

(4) まとめと残された論点

ここで展開した処分場の管理の考え方は、人間の関与を必要としない処分システム（パッシブ・セーフティ）に移行するための管理のあり方を基本として、段階的に展開される品質確認等の行為、およびさまざまな意思決定者を想定した必要情報に着目してその考え方を整理したものである。特に重要となる管理は、処分場の埋戻し閉鎖時期を決定するための情報の準備であり、想定した処分スケジュールによれば、予定地でのサイト特性調査・実証段階から建設・操業の各段階を通じて準備されている必要がある。つまり、予定地が選定される初期段階で実施される概念設計、予備的安全評価の結果が管理プログラムを構築するための拠り所となる。また、社会的な受容を得るための法規制の準備、事業主体の信頼性の構築（コンフィデンス・ビルディング）プログラムも平行して展開されなければならない。

【参考文献】

- 1) IAEA (1989), Safety series No.99, Safety Principle and Technical Criteria for the Underground Disposal of High Level Radioactive Waste
- 2) IAEA (1995), Safety Series No.111-F The Principles of Radioactive Waste Management
- 3) OECD/NEA (1994), Environmental and ethical aspects of long-lived radioactive waste disposal, Paris, 1-2 September 1994
- 4) 原子力安全委員会 (2000) : 高レベル放射性廃棄物放射性廃棄物処分に関する安全規制の基本的考え方について (第1次報告)
- 5) 原子力安全・保安院 (2007) : 放射性廃棄物の地層処分に係わる安全規制制度のあり方について (案)
- 6) 原子力安全・保安院 (2007) : 高レベル放射性廃棄等の地層処分に係わる安全規制について (報告書)、
- 7) McKinley I.G., Alexander W.R., Kawamura H., Tsuchi H (2000), Convergent evolution of high-level nuclear waste (HLW) disposal concepts in Switzerland and Japan. 31st International Geological Congress
- 8) Hideki Kawamura, Neil. A. Chapman, Charles McCombie, Ian. G. McKinley (2005), Staffing and monitoring for the Japanese L/ILW repositories, Proceeding of ICEM'05, May 2005
- 9) Hideki Kawamura, Ian G. McKinley, Satohito Toguri, Hidekazu Asano (2008), Quantifying the performance of various EBS emplacement methods, IHLRWM 2008, Las Vegas, NV, Sep 8-12, 2008
- 10) 河村秀紀、Ian G. McKinley (2008) : 閉鎖前のセーフティケース、日本原子力学会秋の大会

4.3.2 多属性効用解析を用いた意思決定手法

地層処分事業を段階的に進めるには、多岐にわたる視点、あるいは評価の指標からの意思決定が求められる。原環機構が設定した 8 項目の設計因子（NUMO TR-04-01,2004）もその一つである。透明で追跡性のある意思決定プロセスを示すことは、セーフティケースを説明する上で重要となる。本節では、原環機構が実施する概要調査地区選定の意思決定の手法として開発した多属性効用解析（Multi Attribute Analysis：MAA）に関する研究成果を記述する。

(1) 研究の背景：MAA

MAA の基本的な考え方は、1995 年に米国で発案され多くの分野で用いられている。その特徴としては、異なる特質を有する因子を重み付けし、定量的な意思決定に結びつける方法で、基本概念は日常生活の中でも使用されている。例えば車について、性能、スタイル、色、安全性、燃費、維持費など相反する性格を有する視点から総合的に選択する場合、できうる限り主観的な要素を排除しつつ、点数をつけ、最終的に各因子に重み付けをするという、社会通念として受け入れやすい方法である。

意思決定を定量的にするには、MAA を構成する因子（Attribute）に関する目標（ゴール）を設定し、そのゴールへの達成度を数字で示す（スコアリング）ためのモデルが必要となる。また、因子の特質を分析し、同じゴールを有するレベルに分類することも必要となる。例えば、地下水流動特性の特質を示す因子として、動水勾配、透水係数、間隙率などが設定される。また、これらの因子相互の重要性を判断するための重み付けをする必要がある。上記の例で 3 つの因子が地下水流動場にとって、同じレベルで重要であれば、重み付けはイーブン（1/3 ずつ）となる。これらの異なる因子について各レベルのゴールを設定し、関連性を体系化すると図 4.3.2-1 に示す階層構造を構築することができる。階層構造の最下部の因子が特質の構成要素であり、それぞれがスコアリング・モデルに従い定量化される。

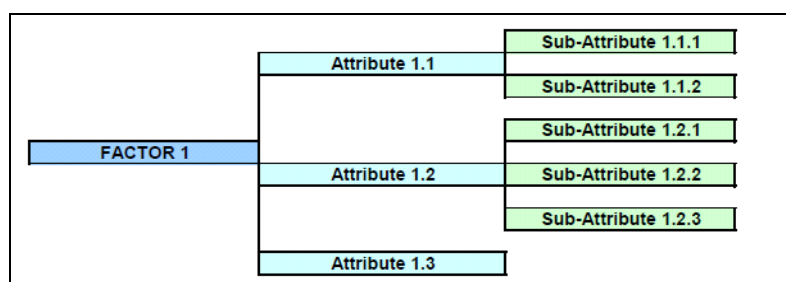


図 4.3.2-1 MAA の階層構造例（NUMO 2004）

(2) 概要調査地区選定考慮事項へのMAA手法の適用

原環機構では、概要調査地区選定上の考慮事項のうち、「付加的に評価する事項（付加的事項）」の評価については、全ての事項を総合的に評価するほか、必要に応じて複数の応募区域を対象に相対比較を実施することとしている（原環機構、2002）。相対比較を行うには、総合評価の共通的な指標を設定し、付加的事項との関連性を明確にしたうえで、追跡性と透明性のある手法を用いる必要がある。本研究では、一般化された MAA 手法を改良し、付加的に評価する事項の総合評価と相対比較する手法を開発した上で、試行を通じて適用性を考察した。

(i) MAAの階層構造化とスコアリング・モデルの設定

付加的に評価する事項は、大きく 6 項目に分類されており、それぞれが階層構造的な属性を有している。評価事項が独立し階層構造となる性状は、まさしく MAA による多属性的な効用解析の図式と一致する。本研究では、付加的に評価する事項の階層構造を基に MAA の階層構造を図 4.3.2-2 のように設定した。最終的なゴール（好ましさ）は、最上位のゴールについて、サブゴールの定量的な評価結果を用いて重み付けをしながら加算していくことで求めることができる。

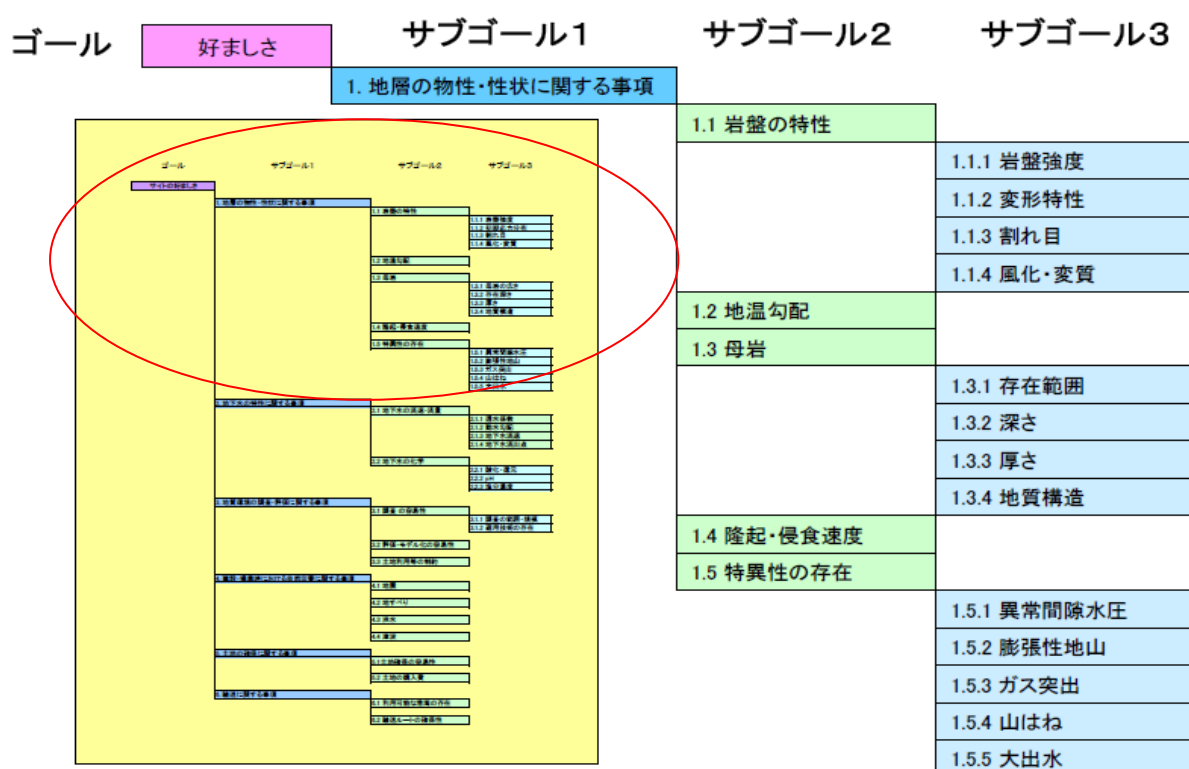


図 4.3.2-2 付加的に考慮する事項の MAA 階層構造（左：全体、右：一部拡大）

MAA の適用性を照査するまでの試行の実施手順を図 4.3.2-3 に示す。MAA のスコアリング・モデルは、階層構造の最下層の付加的事項に対応した各要素を対象に作成し、要素の特徴に応じて定量的なモデル（図 4.3.2-4 参照）と定性的なモデル（表 4.3.2-1 参照）を設定する。その場合、スコアリング・モデルにおける数値は、考慮事項設定の背景となった軸（好ましさ）を縦軸 0～1 の幅で、横軸には評価事項の指標を（岩盤強度であれば MPa）を設定する。また処分場の立地が困難と考えられる閾値を **Killer** として設定することも可能である。これらのスコアリング・モデルは、場所に関係なく専門家の判断で設定される。

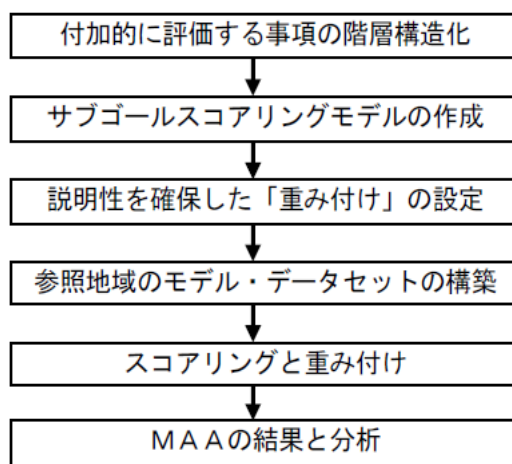


図 4.3.2-3 MAA の実施手順

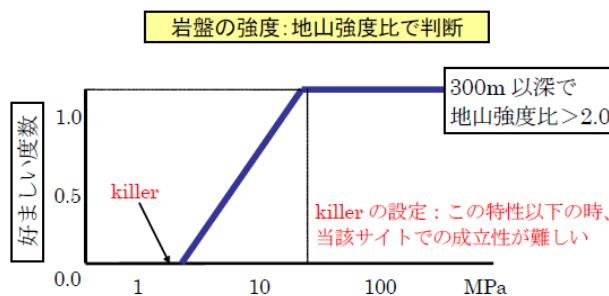


図 4.3.2-4 定量的なグラフでのスコアリング・モデル例

表 4.3.2-1 定性的な評価軸でのスコアリング・モデル例

スコア	サイトの状態
1.0	過剰間隙水圧の存在が認められない
0.5	過剰間隙水圧の存在の可能性がある
0.0	過剰間隙水圧の存在が認められる

(ii) 重み付けの設定方法

サブゴール重み付けは評価結果に大きく影響することから、設定には客観性を含めた透明性の確保が求められる。本研究では、以下の二通りの方法を考案し、MAA の試解析に用いる重み付けを求めた。

- ① HP (Hierarchy Process) 法による重み付け
- ② 設計因子を用いた重み付け (DCM: Design-factor Correlation Matrix) 法

a. HP 法による重み付け

HP 法は、評価する項目相互の比較により、重み付けを行う方法で、様々な分野で広く適用されている。本研究では相互比較の点数として、以下の 4 段階を設定した。これらの点数は、表 4.3.2-2 に示す付加的に評価する事項 (NUMO TR-04-02) を用いた縦軸に対する横軸の対比の形で決定される。表 4.3.2-2 は、本研究を共同で実施した 4 名の合意で設定した結果である (Kawamura, McKinley, Tsuchi, Koike)。

- 1 – roughly equal importance
- 3 – significantly more important
- 5 – very much more important
- 1/3 – significantly less important
- 1/5 – very much less important

表 4.3.2-2 HP 法による付加的事項の重み付け結果 (Kawamura, et al., 2005)

Sub Goal 1	1. Rock properties	2. Hydro properties	3. Site characterization	4. Risk of natural disasters	5. Land procurement	6. Transportation	Marks	Weights	Ranking
1. Rock properties	1	1	3	5	5	5	2.69	0.32	2
2. Hydro properties	1	1	5	5	5	5	2.92	0.35	1
3. Site characterization	1/3	1/5	1	3	5	5	1.31	0.16	3
4. Risk of Natural disasters	1/5	1/5	1/3	1	5	3	0.76	0.09	4
5. Land procurement	1/5	1/5	1/5	1/5	1	1	0.34	0.04	6
6. Transportation	1/5	1/5	1/5	1/3	1	1	0.37	0.04	5
Total							8.40	1.00	

この結果からは、処分場の建設や長期の安全性と密接に関連する因子となる地下水特性に関する評価事項が最も重み付けが大きくなった。HP 法の特徴として、点数をつける人の立場により重要度が異なってくることから、点数付けの専門家の選定が重要な要素となる。

b. 設計因子を用いた重み付け法

付加的に評価する事項と設計因子の関連性の大きさにより重み付けを行う方法を新しく考案した (Design-factor Correlation Matrix : DCM 法と呼ぶ)。設計因子は設計によって処分場概念に付加する性能と特質をあらわしたものであり、これによって処分場概念のサイト環境条件への適合性を包括的に評価することを目的としている (原環機構 TR-04-01, 2004) ものであるが、設計因子との結びつきが強い付加的事項は、因子と同様に重要度も大きいと考えた。まず、設計因子を詳細化した上で、図 4.3.2-5 に示す工学的実現性、長期安全性、事業性の3つの軸で再整理し、本研究では、「総合評価の共通指標」と定義した。付加的事項を縦軸、総合評価の共通指標を横軸とした相互関連マトリクスを作成し、共同研究者との議論を踏まえ、以下の関連性の強さを表わす指標を用いて点数付けを行った。

- 5 for high: Red
- 3 for medium: Green
- 1 for low: Yellow
- 0 for no significance: Blank

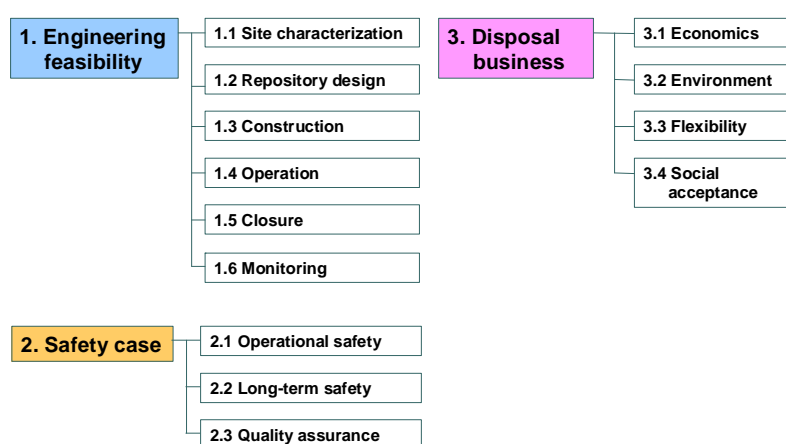


図 4.3.2-5 設計因子の階層構造化と 3 つの総合評価軸 (Kawamura et al., 2005)

付加的に評価する事項を横軸に、設計因子を縦軸にとり、それら相互の関連性の大小の点数付けを実施した結果を表 4.3.2-3 に示す。関連性の点数を合計し、正規化することで付加的事項相互の重み付けを行った。表の右欄にその結果を示している。基本的に上位のサブゴールについては、下位のサブゴールの平均値を基に相対的に重み付けを行っている。

表 4.3.2-3 設計因子を用いた付加的事項相互の重み付け (Kawamura, et al.,2005)

	1. Technical Feasibility						2. Safety Case			3. Disposal Business				Weighting Factor of SUB GOAL 3	Weighting Factor of SUB GOAL 2	Weighting Factor of SUB GOAL 1
	1.1 SC planning	1.2 Repository design	1.3 Construction	1.4 Operation	1.5 Closure	1.6 Monitoring	2.1 Operational safety	2.2 Long-term safety	2.3 Quality assurance	3.1 Cost	3.2 Environmental Impact	3.3 Flexibility	3.4 Acceptability			
1. 地層の物性・性状																19 0.28
1.1 Geological properties															24 0.25	
1.1.1 Strength	1	3	3		3		5			5		3	1	28 0.29		
1.1.2 Stress regime	1	3	3		1		3		1	1			1	16 0.16		
1.1.3 Fracturing	1	3	3	3	3	1	1	5	3	3		5		35 0.36		
1.1.4 Weathering and alteration		3	3		3	1	3	1	1	1	1	1	1	18 0.19		
1.2 Geothermal gradient		3	1	1			1	1		1	1	1	1		10 0.11	
1.3 Host rock															32 0.34	
1.3.1 Area	5	5				3	1	5	1	5	3	5		33 0.26		
1.3.2 Depth	5	5	3	1	1	3	5	5	1	5		5		39 0.31		
1.3.3 Thickness	1	5	1			1	1	3		1		3		16 0.13		
1.3.4 Geometry	5	5	3	3	3	1	1	5	1	5	3	3		38 0.3		
1.4 Uplift and erosion	3	5						5				1			14 0.15	
1.5 Geotec. Properties															15 0.16	
1.5.1 Abnormal pore pressure		1	3	1	1		3		1	1				11 0.14		
1.5.2 Swelling rock		1	3		1		3		1	3			1	13 0.17		
1.5.3 Gas risk	1	1	3	1		1	3	1	1	3	1			17 0.22		
1.5.4 Rock burst risk	1	3	3				3		1	3				14 0.18		
1.5.5 Flooding risk	3	3	5				5		1	3	1		1	22 0.29		
2. Hydro geological properties																21 0.3
2.1 Ground water flow rate															25 0.6	
2.1.1 Hydraulic conductivity	3	3	3	3	3	3	3	5	1	3	3	3	1	37 0.37		
2.1.2 Hydraulic gradient	1	3	3	3	3	3	3	5	1	3	3	3	1	35 0.35		
2.1.3 Velocity	1	1	1	1	1	3		5	1	1				15 0.15		
2.1.4 Discharge point	1							5			3		3	12 0.12		
2.2 Groundwater chemistry															17 0.4	
2.2.1 Eh	3	3	1					5	5			3		17 0.33		
2.2.2 pH	1					1		5	3		1			11 0.22		
2.2.3 Salinity	3	1	1	1	1	1	3	5	3	1	3			23 0.45		
3. Site characterization																12 0.17
3.1 Field works															16 0.46	
3.1.1 Scale required	3	1				3		1	3	3		1	1	18 0.56		
3.1.2 Availability of technology	5					3			3	3				14 0.44		
3.2 Ease of evaluation	3	3						3			1				10 0.29	
3.3 Restriction of access	5									1			3		9 0.26	
4. Risk of natural disaster																5 0.07
4.1 Earthquakes		1	1				3	1		1				7 0.35		
4.2 Landslides		1					1			1				3 0.15		
4.3 Floods		1					3			1				5 0.25		
4.4 Tsunami		1					3			1				5 0.25		
5. Land procurement																5 0.07
5.1 Easy of procurement	1											1	3		5 0.56	
5.2 Cost of Land	1									3					4 0.44	
6. Transportation				3												7 0.1
6.1 Distance to harbor				3						1		1	1		6 0.43	
6.2 Available transportation				3						1		1	3		8 0.57	
	60	70	52	24	24	28	57	71	33	64	24	40	21			0.99
	0.10563	0.12324	0.09155	0.04225	0.04225	0.0493	0.10035	0.125	0.0581	0.11268	0.04225	0.07042	0.03697	1		
			43					54			37					
			0.32					0.4			0.28					

正規化の結果より、地下水特性に関する事項が 30%の相対的な重み付けとなり、次に岩盤特性が 28%、サイト調査性が 17%、輸送が 10%、自然災害と土地の取得性はともに 7%の重み付けとなった。DCM 法の結果が HP 法と大きく異なる要素は、付加的評価事項の階層構造最下部での設計因子との関連性について、専門家の客観的な判断で点数付けを行うことにより、MAA のサブゴール毎に重み付けが可能となり、より客観的な重み付けとなった点である。

(3) MAAを用いた試解析

MAAの適用性を照査するために、付加的に評価する事項として設定されている項目を考慮し、岩盤特性、水理特性、サイト調査性、自然災害の可能性、土地取得の可能性、輸送の観点から特徴のある2サイト（Aサイト、Cサイト）を設定し、比較のための標準的なサイト（Bサイト）として第2次取りまとめでのサイト情報を適用することとした。図 4.3.2-6 に適用性照査のための仮想3サイトを示す。

- ・ A サイト：処分場が沿岸内陸の堆積岩に位置すると仮定、類似のサイトとして幌延地区の文献情報を適用
- ・ B サイト：処分場が内陸の平野の堆積岩に位置すると仮定、第2次取りまとめでのジェネリックな情報を適用
- ・ C サイト：処分場が内陸丘陵の花崗岩に位置すると仮定、類似のサイトとして岐阜県瑞浪地区の情報を適用

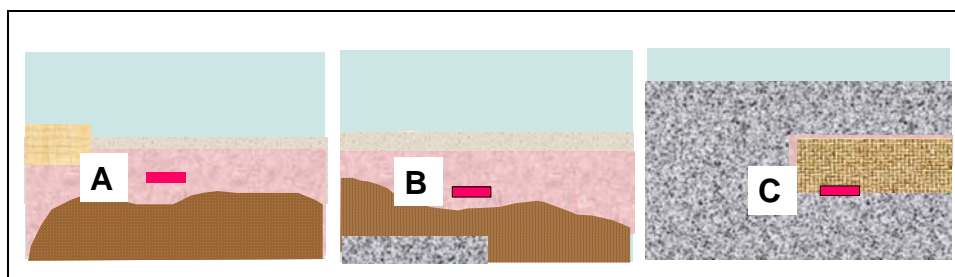


図 4.3.2-6 適用性照査のための仮想サイト（Kawamura et al, 2006）

各サイトの情報をベースとし、付加的に評価する事項を対象に、前述のスコアリング・モデルを用いて点数付けを行い、HP法とDCM法で重み付けを用いて各サイトの「好ましさの程度」を定量的に求めた。図 4.3.2-7に2種類の重み付け方法についての結果を示す。図の表示は、MAA手法を本研究に適用するために表現方法を新たに開発したものである。総合的な好ましさ程度は”Utility”として表わされている。試解析の結果では、重み付けの方法にかかわらず、Aサイトの沿岸内陸堆積岩立地が、他の2サイトに比較して総合的な観点からより好ましいサイトとなった。Aサイトの好ましい因子としては、水理特性、岩盤特性、土地取得、輸送の項目である。

図 4.3.2-7でのUtilityが「好ましさの度合い」を示し、1.0が最高点である。図に示された、例えばAサイトの総合点0.714は、数字自体は物理的に意味をもたないが、そのサイト固有の満足度を定量化したものである。

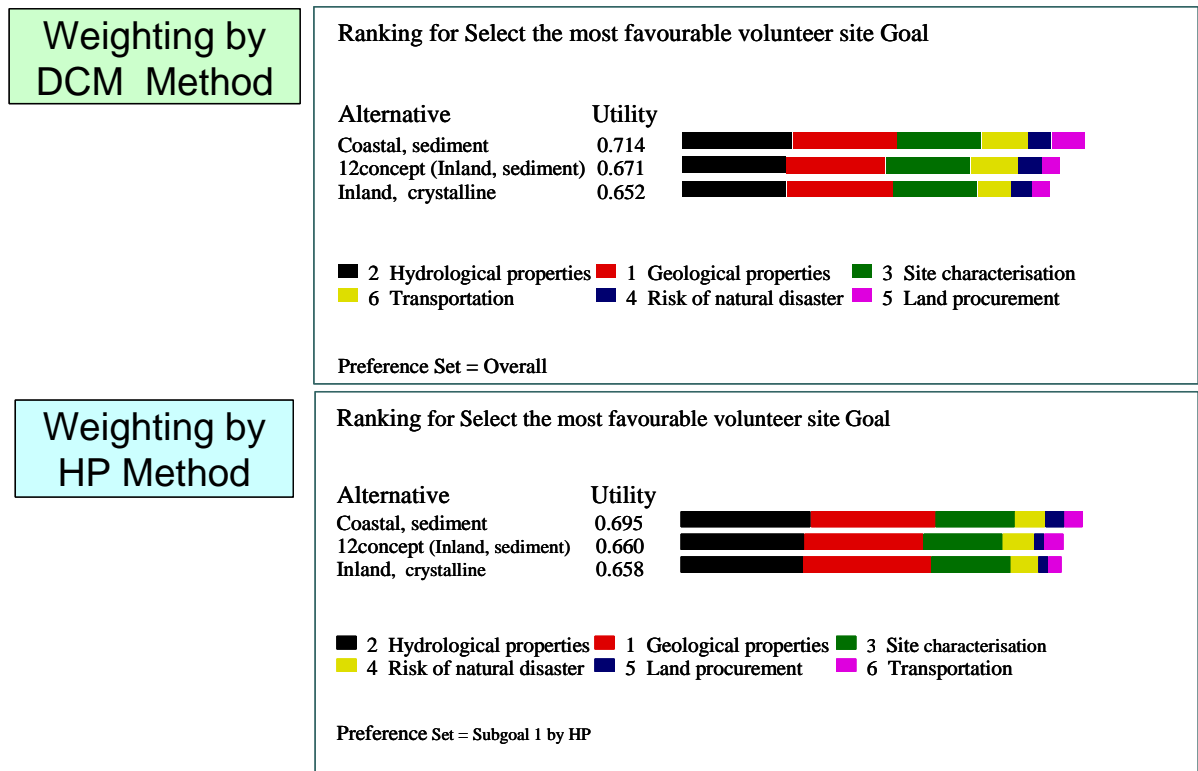


図 4.3.2-7 MAA の結果 (Kawamura et al., 2006)

DCM を用いた重み付け方法では、設計因子との関連性をベースとしていることから、MAA の結果をより広範に考察できる。試解析の結果を設計因子の観点から分析すると、表 4.3.2-4 に示すように、それぞれのサイトが設計因子の観点からどのような好ましさを有しているかを定量的に比較できる。分析結果からは、A サイトが設計因子の中で操業性と環境影響の項目を除いて全ての項目で他の 2 サイトより好ましい結果となっている。特にコストの面で、A サイトが優れていることは、着目すべき点である。この比較において、設計因子は独立したものでなく、安全性とコストのように因子によっては相反する性格を有するため、因子の関連を留意しつつ分析する必要がある。試解析では、文献レベルの情報を使用したため、点数付けでは相反の影響は顕在化してこない。しかし実際には、処分場の建設費用、サイト調査費用、土地取得、用地取得費用など事業の成立性にとって重要な因子が顕在化する可能性がある。MAA 手法の開発では、これらの重要因子の感度を定量的に示すことができるように IT 化を図った。

表 4.3.2-4 仮想サイトと設計因子との関連性 (Kawamura, et al., 2006)

	1. Technical Feasibility						2. Safety Case			3. Disposal Business				Total Preference level
	1.1 SC planning	1.2 Repository design	1.3 Construction	1.4 Operation	1.5 Closure	1.6 Monitoring	2.1 Operational safety	2.2 Long-term safety	2.3 Quality assurance	3.1 Cost	3.2 Environmental Impact	3.3 Flexibility	3.4 Acceptability	
Coastal Sediment	0.791	0.68	0.609	0.746	0.624	0.766	0.653	0.667	0.756	0.786	0.622	0.698	0.764	0.721
Inland Sediment (H12)	0.742	0.655	0.577	0.754	0.562	0.729	0.646	0.634	0.72	0.697	0.637	0.635	0.692	0.659
Inland Crystalline	0.744	0.667	0.608	0.556	0.588	0.731	0.641	0.632	0.711	0.663	0.632	0.589	0.586	0.612

(4) まとめと今後の展開

原環機構が計画する概要調査地区選定作業の中で、付加的に評価する事項の個別評価については、総合的な評価の指標と必要に応じてサイト相互比較が求められている。付加的な評価事項での評価指標（ゴール）は、「好ましさ」という定性的な尺度であり、相互比較での客観的な指標を設定するために MAA 手法の適用を提案した。MAA 手法を用いて客観的な評価を行う場合、以下の項目が重要な作業となる。

- ・ 評価する因子（Attribute）のレベルに対応した階層構造を作成すること
- ・ 点数付けのためのスコアリング・モデルを専門家の合意の下に作成すること
- ・ 分かりやすい重み付けの方法を準備すること

本研究では、直接的に評価できるレベルまでを階層構造化し、最下部の因子に対するスコアリング・モデルを作成した。重み付けに関しては、一般的に用いられている HP 法の適用と新たに設計因子を用いる DCM 法を提案した。さらに仮想サイトを対象に試解析を行うことで、MAA の有効性を確認することができた。

原環機構にとって、サイト選定は最も重要な作業であり、サイトの情報が増えるに従い、処分場の設計や安全評価が具体化・最適化されていく。選定のための意思決定はより工学的・科学的な思考で実施されていくと想定されるが、ステークホルダーの意思決定への参画が受け入れのための条件となる可能性が高い。その際、社会・倫理的な観点での因子を考慮する必要があり、本研究で取り扱った「操業時の安全性」、「回収可能性」、「事業の柔軟性」、「受容れ性」などの因子への重み付けが高くなると想定される。

今後は、実作業への展開を考慮し、最下部の因子のスコアリング・モデルをより厳密に作成し、Killer となる分岐点の設定、重み付けの方法についての試行を重ね手法として確立する。さらに、情報の品質を 3.2 節で取り扱った調査システムフロー等を用いて分析し、MAA に用いる情報として整備する、また、他のステークホルダーの参画を想定した MAA の簡略化などを図っていく。

【参考文献】

- 1) NUMO (2004): Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environment, NUMO-TR-04-03
- 2) NUMO (2004): Evaluating Site Suitability for a HLW Repository: Scientific Background and Practical Application of NUMO's Siting Factors, NUMO-TR-04-04
- 3) Hideki Kawamura, Hiroyuki Tsuchi, Akihiko Koike, Shoko Sato (2007): Development of improved methodology for the comparative assessment of potential repository concepts and location, Proceeding of ICEM'07
- 4) JAEA (2005): 1st Stage of site investigation of Horonobe Area
- 5) JAEA (2004): 1st Stage of site investigation of Mizunami URL
- 6) 河村秀紀、佐藤晶子、土宏之、小池章久、須山泰宏、高瀬博康、稲垣学、松村淳、吉村実義 (2006) : 付加的に評価する事項による相対評価の信頼性向上方法に関する検討(その 2) 多属性効用解析 (MAA) を用いた評価方法の一考察、第 61 回土木学会年次学術講演会後援概要集

第5章 セーフティケースとストーリーボード

前章まで、セーフティケースをキーワードに、閉鎖前と閉鎖後のセーフティケースの統合化の必要性、工学的・科学的・社会・倫理的なセーフティケースへのアプローチの可能性について、研究成果を取りまとめてきた。その作業を通じて、共通した課題として認識できたことは、放射性廃棄物処分の安全性をセーフティケースという枠組みで語るときに、極めて広範にわたる学際的な協力が必要となること、段階的な事業の展開には多くのステークホルダーが参画できる意思決定の仕組みが求められていることである。

前者の学際的協力は、後者の意思決定へのインプットにも寄与しなければならず、専門家集団と異なるステークホルダーとの間に、共通の言語やインターフェースとなる媒体が必要となることが推定される。第2章で分析したように、処分が事業化され実現に向けての段階に至り、従来の安全評価をその中核的な媒体として使用する試みは、説明性と透明性の観点から困難になってきている。安全評価は、放射線学的な安全指標との定量的な比較を目的としていることから、長期の安全評価で扱う多くの現象モデルが、専門家の判断で極めて単純化・保守化されており、現実に生活している人々が評価の内容を実感として理解することが困難となっているからである。

地層処分の安全確保の本質は、極めて長期にわたり毒性が継続する放射性物質を、最も信頼できる地下深部に埋設し、人間の環境及び関与から隔離することである。ステークホルダーにこの安全確保の本質を理解してもらわなければ、安全評価結果は意味を持たない。したがって、廃棄物から手を離すまで、工学や科学、および社会的な制度を含めたできうる限りの対策を準備し、ステークホルダー間の理解を得るための方法や媒体を開発する必要がある。

本章では、このような方法や媒体を準備する試みの一環として、地層処分の仕組みを理解するための共通の作業の場（プラットフォーム）として、あるいは意思決定に参画するステークホルダーの共通の認識を与える媒体（インターフェース）として開発した「ストーリーボード」に関する研究成果を取りまとめる。セーフティケース構築に適用できるストーリーボードの開発は、本論文が目標とする主要な成果となる。

5.1 ストーリーボードの開発

本節では、処分事業にかかわる多くのステークホルダーと専門家が、セーフティケースの基本となる処分システムの理解に向け、認識を共有するためのプラットフォームとインターフェース

として開発したストーリーボードの概念とその開発の経緯について記述する。

5.1.1 安全評価における時間枠と評価の領域

(1) 評価の時間枠

高レベル放射性廃棄物廃棄物の安全評価では、多重バリアシステムの放射性核種の閉じ込め性能を定量的に評価するために、放射性核種が人間環境にいたる様々な挙動をシナリオとして構築し、対応したモデルを設定している。モデルにおける安全評価の信頼性は、評価に用いるシナリオの確からしさ（起こりやすさ）に依存する。シナリオの確からしさと起こりやすさに不確実性をもたらす因子については、古くから多くの議論がなされており（OECD/NEA, 1995）、以下に示す大きく二つの理由（軸）が取り上げられた。

- ・ 評価の期間が長くなること（時間の経過に伴う不確実性）
- ・ 評価の範囲が広いこと（空間の大きさに関係なく存在する不確実性）

被ばく線量レベルで論じられている長期の安全性については、評価の時間枠に関係なく、線量の最大値が出現するまで解析することを求めている（原子力安全委員会、高レベル放射性廃棄物地層処分の安全に関する基本的考え方、2004）。例えば、図 5.1.1-1に示す第2次取りまとめでの線量解析結果では、ピーク値は処分場閉鎖後の100 万年前後に出現している。

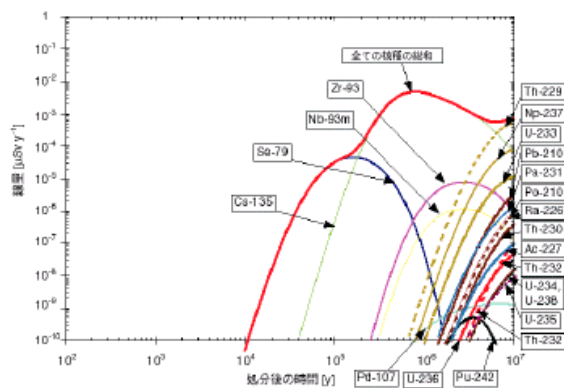


図 5.1.1-1 安全評価による被曝線量解析結果（第2次取りまとめ、1999）

この解析では、①処分場の周辺の環境が、隆起や侵食など天然事象により変化しない、②多重バリアのシステムが期待通りの性能を発揮する、と仮定し、ガラス固化体の放射性核種が全て地

下水に溶出し、地下水の流れとともに地表に到達するという保守的なシナリオのもとに計算された潜在的な被曝線量を示している。このような被曝線量を解析するモデルは、時間的な場の連続した変遷を考慮できるレベルに達しておらず、多くの保守的と呼ばれる仮定と専門家の判断により極めて単純化されている。専門家によるこのような評価に対するレビューについては、安全評価での単純化することの是非ではなく、単純化に至るプロセスの不透明性と、判断の根拠となるエビデンスの不十分さが指摘された（JNC,2001）。

評価の時間枠が対数で示されていることにも起因するが、100 万年という時間の長さが実感できず、予測に基づくモデルの不確実性が時間の経過とともに増大するという根本的な問題点への不信任が、社会との接点となる信頼性の醸成（コンフィデンス・ビルディング）を困難にしている。

われわれの祖先である現代人がアフリカに現れたのが 10 万年前といわれているが、安全評価でははるかに超える時間枠を用いて将来の潜在的なリスク評価を取り扱っている。しかし、地質学的な観点からすると決して長い期間ではない。現在の日本列島の応力場を形成しているプレート動きは数 100 万年間変化していないと分析されており、アフリカのガボン共和国で発見されたオクロの天然原子炉を対象としたナチュラルアナログ研究では、放射性核種は 20 億年にわたり同じ場所に留まっていたというエビデンスも報告されている。

一方、工学的な観点からすると、現存する最も古い建築物、例えばエジプトのミラミッドは 5000 年前に作られており、ローマ時代に使用された 2000 年前の鉄釘も現存する。われわれが近代技術で構築する鉄筋コンクリート製の橋や建物の歴史は 100 年程度である。人間が直接関与する地層処分場の建設・操業期間は 40 年間を見込んでおり、閉鎖後は 300 年程度の制度的管理の継続が議論されている。

社会的な通念からすると、経済予測はせいぜい 1 年程度、中長期計画といわれているもので 5 ～10 年程度の時間枠を対象としている。数ヶ月先でさえ、予測の不確実性は存在している。さらに人間の関与が加われば、その不確実性は等比級数的に増加するであろう。つまり、われわれが考慮しなければならない評価の時間枠では、本質的に不確実性が内在することを避けることはできない。これらの時間に伴う不確実性の存在を、処分システムの理解を通じて共通の認識とする必要がある。

(2) 評価の領域

安全評価で最も重要な作業の一つに、評価の対象とする場の理解とその変遷の予測があり、第

4章で扱った地下水流動場の変遷等が対応する。多重バリアを安全確保の基本とする高レベル放射性廃棄物の地層処分では、人工バリアと天然バリアの初期特性把握と時系列の変化予測が基本となり、さらに人間への放射線学的な影響を評価するために、生物圏という食物連鎖を扱う評価の領域が加わる。人工バリアは、第2章に記述した、ガラス固化体、オーバーパック、ベントナイト緩衝材を構成要素として、各々放射性核種を閉じ込め、移行速度を遅延させる安全機能を有している。第2次取りまとめでの概念では、人工バリアの大きさは、数 m の単位となる。また人工バリア周辺には、EZD (Excavated Damage Zone) と呼ばれる処分坑道掘削時の損傷領域があり、両者が処分場全体を包含する領域を形成する。さらに外側に、人工バリアを物理・化学的な変動から保護し、放射性核種を閉じ込め、核種の移行を遅延させる機能を有する天然バリアの領域がある。天然バリアにおいては、地下水流動場のスケールを基本とすることから、その境界条件を考慮して、領域の大きさは、数 km から数 10km の範囲を対象となる。天然バリアと生物圏の境界は、GBI (Geosphere and Biosphere Interface) と呼ばれる特殊な領域を形成することがある。生物圏には人間への食物連鎖を考慮した、大小のコンポーネントが評価の領域として設定されている。

地層処分の前提となる地質環境の安定性の評価では、火山や断層活動の評価に加え、隆起・沈降、侵食などのプレート運動に起因するテクトニクス、および地球規模の気候変動など、その評価に関連する時間スケールとともに対象規模も大きくなっていく。一方、構成材料の変質や物質の移行メカニズムを説明するために作成されるプロセスモデルの領域では、分子レベル単位での分析（分子動力学を用いたメカニズムの説明、Kawamura, 2004）が実施されている。放射性核種が人間に与える影響を評価するためには、このように、分子レベルから地球規模までの領域を扱う必要が生じる。地質環境に係る情報という観点からは、第4章で場の総合的な理解」として提唱した Geosynthesis という異なるデータ相互の関連性も考慮に入れなければならない。したがって、セーフティケース構築の初期段階では、着目している処分システムの理解をするうえで、対象領域の相互関係をビジュアルに捉える媒体が必要となる。

(3) 既存安全評価での前提

第2次取りまとめで対象とした安全評価の評価領域は、特定のサイトを対象としていないため、図 5.1.1-2に示すように多くの仮定を設定している。例えば、人工バリアのモデルでは、その設置の形態や処分場のレイアウトに依存せず一本のガラス固化体からの核種移行をモデル化する、天然バリアの規模を 100m とする、岩盤の上部の滞水層までの移行経路として高透水性の断層破

砕帯を仮定する、GBIとして河川での希釈を考慮する等である。

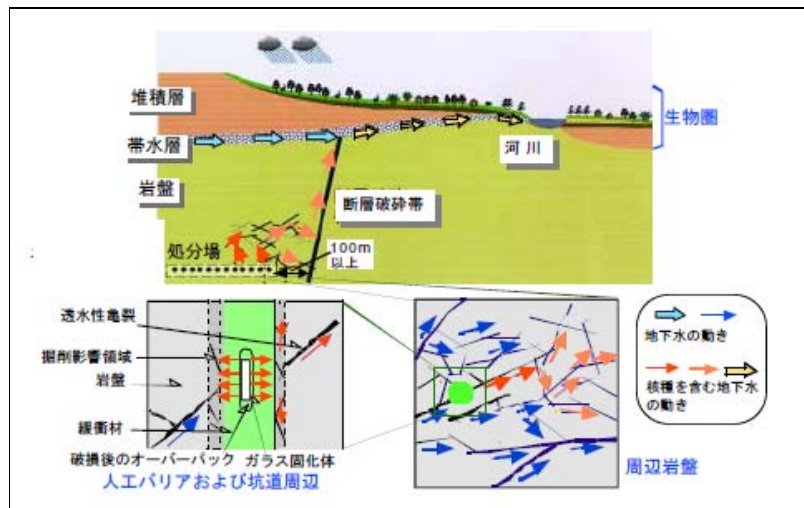


図 5.1.1-2 第2次取りまとめにおける評価領域の設定 (JNC, 1999)

安全評価では、このような場の状態変遷と核種の地下水による移行プロセスを最も起こりやすい基本シナリオとして設定した (JNC, 1999)。第2次取りまとめで記述されている基本シナリオは以下のとおりである。

- ・ 処分後 1000 年の時点において、オーバーバックが核種閉じ込め機能を喪失すると仮定する。
- ・ オーバーバック破損後、直ちに緩衝材間隙水がガラス固化体と接触し、長期的なガラス溶解速度にしたがってガラスマトリクスの溶解が進む。核種はガラス固化体中で均質に混合されており、ガラス固化体での存在比に応じてガラスから溶出する（調和溶解）。なお、ガラス固化体の溶解に伴うガラスの表面積の時間的な減少は考慮せず、ガラス固化体は一定の速度で溶解すると仮定する。
- ・ ガラス固化体近傍あるいは緩衝材中での核種濃度は、同位体の存在比に応じて分配されたり、溶解度により制限される。溶解／沈殿反応は瞬時／可逆と仮定する。なお、溶解度の分配において考慮する同位体は、ガラス固化体にインベントリとして含まれているもののみ考慮する。
- ・ 核種は緩衝材中を拡散により移行し、緩衝材に収着することにより遅延される。この際、収着反応としては、瞬時／線形／可逆を仮定する。

- ・緩衝材の外側に達した核種は、人工バリア周辺の母岩の掘削影響領域を通過する地下水と瞬時に混合し、その全量が母岩中の亀裂に流入すると仮定する。なお、掘削影響領域における収着などによる核種遅延効果は、保守的に考慮しない。

第2次取りまとめを作成する段階での研究の主眼が人工バリアにあり、基本シナリオの記述も人工バリアの性能が中心となっている。室内試験や原位置試験の結果から得られるデータやエビデンスがこれらの状態変化を予測するプロセスモデルに反映される。核種の移行モデルはこれらのプロセスモデルを基盤として、さらに単純化され、保守的なパラメータ設定がなされたうえで、図 5.1.1-1 に示す解析結果が得られている。

すなわち、数 10 万年以上に及ぶ状態変遷は段階的なバリア機能の変化で記述され、解析は段階的な変化に伴うモデルにより数 100 万年以上実施された上で、放射線影響のピーク値が得られる。その値には、仮定と前提をサポートする多くのエビデンスと多岐にわたる専門家の判断が凝縮されているが、評価のシナリオ作成では、それらの知見の集約が表面に現われることはない。シナリオが定量的な評価にのみ使われる場合、不確実な事象やプロセスは、モデル作成やパラメータ設定時の保守的判断を用いてハンドリングされている。この傾向は、わが国だけでなく、処分計画が先行している各国でもみられ、処分事業が実現段階に至るにつれ、安全評価の不十分さを補い、また他の角度からの安全性を示す試みとして「セーフティケース」という概念が新しく提唱されてきた（第2章参照）。

5.1.2 ストーリーボードの誕生

(1) ストーリーボードの開発目標

前節に記述したこれまでの安全評価を中心としたセーフティケースの構築における課題は、以下にまとめることができる。

- ・広範囲かつ長期の変遷に伴う不確実性を扱うために、様々な評価分野で科学・工学的な整合性を保持しつつ、場の変遷および安全機能の変遷をストーリー（シナリオ）として統合化する作業過程が極めて複雑になること
- ・異なる時間枠と評価領域で多くの専門家の参画が不可欠であるが、専門家の知見をセーフティケースとして組み上げていく仕組みが確立されていないこと
- ・核種移行解析結果だけでは、そのベースにある状態変化予測に用いた前提やプロセスの説明ができず、ステークホルダーへの情報伝達と理解醸成をはかり、意思決定に参画できる媒体

が準備されていないこと

これらの課題を解決するために、セーフティケース構築に向けての新しい手法となるストーリーボードの開発目標を以下に設定した。

- ・セーフティケース構築の基本となるシナリオ構築の複雑さについては、評価の対象となる場全体の変遷と重要なプロセスや事象の発生とその影響の伝播を抽出し、ストーリーとして組み立てる作業を系統的に実施できる枠組みを構築すること
- ・専門家の判断や議論の結果を集約するにあたり、放射性廃棄物処分の安全性を示すという共通の場で議論できるプラットフォームを作成すること
- ・ステークホルダーの理解の醸成をはかるには、安全性の議論や評価の全体像をビジュアルに示す手法を準備すること

(2) ストーリーボードの概念に向けて

前章でセーフティケースの概念を示すために、これまでの研究成果を取りまとめ記述してきた。その基本姿勢は、セーフティケースを用いることにより、実施者の意図するところを確実に伝え理解してもらうことであり、地層処分の実現には不可欠な要素である。つまり、処分での最大の課題となる安全性の問題に対しての実施者や規制者の取り組み方針を明示することがその第一歩である。前述のセーフティケース構築のための手法の準備は、その具体的な取り組み方策として位置づけている。

1999年に第2次取りまとめが公表され、高レベル放射性廃棄物処分の技術的信頼性と処分候補地選定に向けての技術の拠りどころが示された。国内外の専門家のレビューを受け、内容的には高い評価を受けた報告書である。しかし、安全評価を中心とした内容の包括的な理解は、極めて限られた専門家しか理解できていない。包括的な理解とは、第2次取りまとめの第1分冊の「わが国おける地質環境」、第2分冊の「処分場の工学技術」、第3分冊の「性能評価」および別冊として準備された「処分の背景情報」を横断的に理解し、それぞれの関連を分かりやすく説明している点で、いわゆる‘How’を提示したものである。セーフティケースとして必要とされるものは、Howだけでなく、多くのステークホルダーが抱く‘Why’への回答である。第2次取りまとめは、それぞれの分野での研究成果の取りまとめであり、処分事業を進める上での情報の素材とはなるが、メッセージにはなっていない。

最初の「ストーリーボード」の概念は、第2次取りまとめが公表された後、安全評価からセーフティケースへの提唱の時期に、新しく処分事業に参画した人々に説明する資料として、筆者が作成した。その際の要求は、安全評価で何を扱っているのか、評価の対象は、今どこまで説明ができるようになっているのか、全体像を分かり安く説明して欲しいというものであった。当時はストーリーボードとは呼ばずに、処分場の変遷プロセスの説明資料として作成した。

(3) 処分場の変遷プロセスからストーリーボードへ

第3章でのセーフティケースに関する記述の中で、処分場閉鎖前のサイト調査・評価段階から処分施設を建設・操業・閉鎖するまでの処分システムを構築し評価する行為が、閉鎖後のセーフティケースの前提となることを提唱した。処分全体システムの状態変化を把握する上で、人間が直接的に関与できる工学と科学を統合した知見と経験が、重要な役割を果たすことを示唆したものである。

閉鎖後のセーフティケースでは、人間が関与することなく多重バリアによるパッシブ・セーフティがどの程度維持されるのか、またその前提となる状態設定の確からしさが求められる。特に処分で扱う時間枠は数百万年に及ぶことから、処分システムの変遷にともなって発生する不確実性への対応が長期評価での最も重要な課題となる。

不確実性には、本質的に存在する発生がランダムな事象でその大きさも統計的に変動分布するようなものと、知識の不足による不確かさがある。前者を扱うには異なる部門の専門家による判断が不可欠で、セーフティケースの観点からは、処分システムの長期評価の目標に立脚した論点と様々なエビデンスの集約が求められる。

本研究が対象としている処分システムは、今後段階的に構築されていくため、現状での考察は、これまでの研究成果をベースに実施することになるが、前章までに論じたように、要求は明確になってきた。本論文で提唱する、工学的なアプローチと科学的なアプローチを、社会・経済的な側面で統合化するための手法（ストーリーボード）は、閉鎖前から閉鎖後までのセーフティケースを一貫して扱い、特に将来的な状態設定に内在する不確実性を、明瞭に認識することを目標として開発してきたものである。

(4) ストーリーボード誕生へ

セーフティケースの最も重要な要素は、依然として安全評価であるといえる(IAEA:WS-R4)。その安全評価の出発点がシナリオ解析であり、その解析は、処分システムの理解から開始される。これまでの作業では、多くの専門家がそれぞれの分野で処分システムをイメージし、安全性にかかわる事象やプロセスを抽出することから作業が開始されてきた (IAEA: Safety Standard Series)。

参加した多くの専門家は、自分たちの専門知識がいかに統合されて安全評価に結びついていくのか説明されることなく、それぞれの立場でシナリオ解析のための情報を提供してきたに過ぎない。例えば、地質環境の長期変遷については、広い範囲を対象にしたわが国の地質や天然事象の特徴が、それぞれの対象範囲で個別に整理されてきた。例えば、第2次取りまとめでの地質環境の記述、NUMO 概要調査選定の考慮事項などに見られる記述が挙げられる。これらの記述については、安全評価に取り入れる手法、および相関する状態設定の経過について、異なる専門家の議論を行なう共通の場がなく、情報としては一方通行であった。情報提供だけでその使用方策についてのフィードバックはなされていない状態である。

これらの経験に基づき、3つ目の課題に着目し、異なる分野の専門家を処分システムの安全性を評価する議論に参画してもらうための共通の場（プラットフォーム）としてストーリーボードの概念を作り上げてきた。

ストーリーボードの名称は、筆者が研究を共にしている海外の専門家との議論の中で作り上げてきたものである。初めてストーリーボードとして作成した際は、前述した「処分場の変遷プロセス」という表題を付け発表した（土木学会年次講演会）。同時に海外での安全評価の専門家との議論を通じて“Storyboard”という固有の名前を認知してもらい、そこに記述されるコンテンツについても明確に規定することができた。

図 5.1.2-1に 2000 年当時に初めて作成した高レベル放射性廃棄物処分を対象としたストーリーボード（ここでは「第一世代のストーリーボード」と呼ぶ）を示す。このストーリーボードは以下の特徴を有する。

- ・ 地質環境と人工バリアを含む処分場概念は、第2次取りまとめで対象としたジェネリックな堆積岩としている。
- ・ 処分場概念は横軸に評価の時間枠を縦軸に評価の領域を配置し、縦の最下段にはそれぞれの

時間枠での評価上の留意点を記述している。

- ・ 閉鎖後のセーフティケースに着目し、閉鎖後 100 年、1,000 年、10,000 年、100,000 年、1,000,000 年の時間枠を設定している。この時間枠は、特別な意味を持つものでなく、対数的な時系列を軸とした。
- ・ 評価領域としては、ニアフィールド、処分場スケール、ファーフールドを対象とした。尚、第2次取りまとめでは生物圏が固定されていたため、ストーリーボードからは除外した。これらの領域の決め方は、安全評価を念頭に作成したこともあり、ルール化されたものではない。
(5.1.2 でセーフティケースを考慮したストーリーボードの作成について記述する)
- ・ 時間領域と評価領域で構成されるマトリクスと呼ぶ枠組み内に、発生が想定される事象やプロセスを、第2次取りまとめでの表現を考慮して記述するとともに、評価領域としての場の特徴を記述している。
- ・ ニアフィールドの変遷では、より現実的な記述とするために、堆積岩立地で必要となるコンクリート支保工の存在を考慮し、その変質について着目している。
- ・ ファーフールドの変遷に関しては、より現実的な記述とするために、確実に発生する隆起・侵食および気候変動を考慮している。
- ・ 場の変遷とともに放射性核種の移行状態を記述し、パッシブ・セーフティとしての重要な状態が説明できるようにしている。
- ・ 解決すべき課題と現状の項では、状態変遷の記述のために必要とされる情報を課題として整理し、現状(2000 年)での知識のレベルを記述している。

処分場の変遷プロセスと解決すべき課題


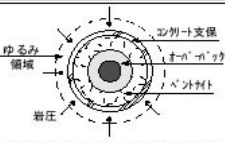
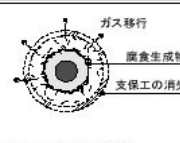
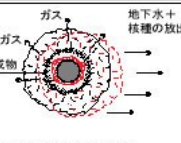
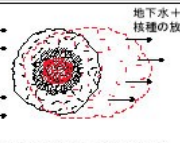
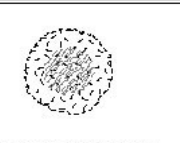

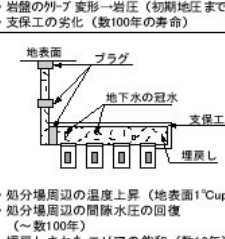
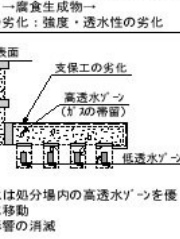
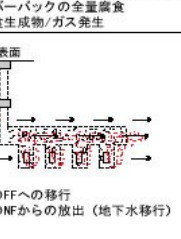
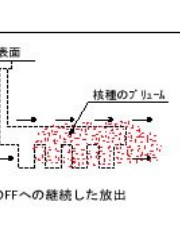
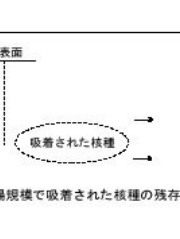

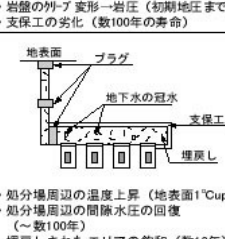
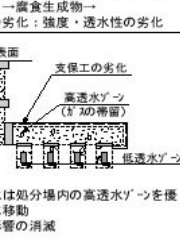
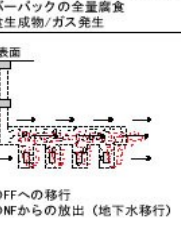
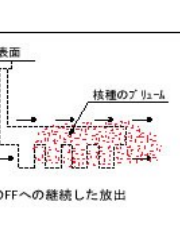
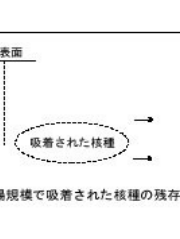
	～100年	～1000年	～10,000年	～100,000年	～1,000,000年
<p>処分概念</p> <ul style="list-style-type: none"> ・陸地処分 (500m) ・堆積岩 ・廃棄体設置方式 ・生物圏は現状で固定 	<p>ニアフィールド (NF)</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体の発熱 (ピークは20～30年後) ・地下水の再冠水 (飽和まで数10年程度) ・ベントナイトの膨張 (5MPa程度) ・岩盤のクレープ変形→岩圧 (初期地圧まで) ・支保工の劣化 (数100年の寿命) 	<p>ニアフィールド (NF)</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・地下水のオーバーバック接触 →腐食→ガス発生 →ベントナイトの破壊 →腐食膨張 →ベントナイトの破壊 →腐食生成物→ ・支保工の劣化：強度・透水性の劣化 	<p>ニアフィールド (NF)</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・地下水のガス固化体に接触 →核種の浸出 →ベントナイト中の拡散移行 (吸着) ・オーバーバックの全量腐食 →腐食生成物/ガス発生 	<p>ニアフィールド (NF)</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・ガラス固化体の浸出→核種の溶解 →NFへの移行 (人工バリア内での吸着) 	<p>ニアフィールド (NF)</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・吸着された核種のNF内での残留
<p>処分場スケール</p> 	<p>処分場スケール</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・処分場周辺の温度上昇 (地表面1°Cup) ・処分場周辺の間隙水圧の回復 (～数100年) ・埋戻しされたエリアの飽和 (数10年) 	<p>処分場スケール</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・地下水は処分場内の高透水ゾーンを優先的に移動 ・熱の影響の消滅 	<p>処分場スケール</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・ガスのFFへの移行 ・核種のNFからの放出 (地下水移行) 	<p>処分場スケール</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・核種のFFへの継続した放出 	<p>処分場スケール</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・処分場規模で吸着された核種の残存
<p>ファイフィールド (FF)</p> 	<p>ファイフィールド (FF)</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・初期の地下水流動状態 [隆起・侵食 (平均0.1mm/年)] 	<p>ファイフィールド (FF)</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・初期の地下水流動状態の維持 	<p>ファイフィールド (FF)</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・気候変動→海水面変動→地下水面変動 →地下水流動系の変化 (有為な変化なし) 	<p>ファイフィールド (FF)</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・隆起/侵食 ・高透水ゾーンに沿った核種移行 ・天然バリア中の核種吸着 	<p>ファイフィールド (FF)</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・隆起/侵食 (100m上昇) ・滞水層中での核種移動 ・地下水流動場の変化 ・断層の活動→処分場領域は静穏域
<p>解決すべき課題と現状</p>	<p>①NFの挙動評価：核種放出の初期条件の確認</p> <ul style="list-style-type: none"> ・廃棄体の発熱 ・再冠水 ・クリップ応力 ・地球化学条件の不変性 ・発熱→埋設ピッチ (レイアウト) に対応 (処分坑道が20～30年埋戻されない場合、熱はクリティカルにならない) ・再冠水→解凍/実験で確認中 ・ベントナイト膨張→実験で確認 ・岩盤のクレープ→実験中 ・支保工の劣化→実験中 <p>②処分場規模での環境回復</p> <ul style="list-style-type: none"> ・水理モデルでの予測解析→数100年後 ・坑道中の残存空気 (不飽和) の影響評価 	<p>①NFの挙動評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・オバ・バ・バの腐食 →ガス発生 ・岩盤クレープ 応力 ・支保工の劣化 ・ベントナイトの健全性 ・地球化学条件の不変性 ・NFの水理特性の変化 ・オバ・バ・バの腐食→Zn→研究中 ・腐食生成物の挙動→研究中 ・支保工の劣化の影響 →ベントナイトの変化 (研究中) →水理場の変化 (研究中) <p>②処分場規模の挙動</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地下水流動場の変化→解析的に実用中 	<p>①NF内での核種移行</p> <ul style="list-style-type: none"> ・オバ・バ・バの腐食 →ガス発生 →腐食生成物 ・ベントナイトの健全性 ・ベントナイト中の地球化学特性 ・核種の移行特性の変化 <p>②処分場規模</p> <ul style="list-style-type: none"> ・処分場規模での地下水流動場の変化 (解析的に実用) ・ガスの移行 (研究中) <p>③FFの水理場の挙動確認</p> <ul style="list-style-type: none"> ・深部地下水挙動の変化の解析的な把握 →変動中としての評価 (実施中) 	<p>①NF内での核種挙動</p> <ul style="list-style-type: none"> ・吸着され残存する核種の量の推定 <p>②処分場規模</p> <ul style="list-style-type: none"> ・処分場規模の水理場内での核種の挙動予測 (安全評価上はこれまで考慮されていない) <p>③FFにおける水理場の変動と核種の移流 (滞水層の変化?)</p>	<p>①NF内での核種の残存量の推定</p> <p>②処分場規模での残存核種の推定</p> <p>③FFでの水理場の変動中を考慮した核種の移行</p> <ul style="list-style-type: none"> ・断層等の活動が処分領域に変化を及ぼさないことのシミュレーション

図 5.1.2-1 第一世代のストーリーボード (ストーリーボードの原型：2000 年作成)

人工バリアシステムについては、各構成要素の時系列的な変遷に着目し、特性変化と状態を併記する形をとっている。ストーリーボードのもう一つの特徴として重要な点は、多重バリア中を流れる地下水の動きと、地下水に溶解した放射性核種の動きを示した点である。第2次取りまとめまでの安全評価の流れでは、金属製のオーバーパックが1,000年で閉じ込め性能を喪失し、放射性核種がベントナイト緩衝材中に溶出するプロセスから評価が開始されている。ストーリーボードでは、このような前提を図として表示している。現実的なプロセスを追求した場合、ガラス固化体からの核種の放出ははるかに複雑な系となる。

処分場スケールでのストーリーボードの記述は、処分場の建設による周辺環境、特に地下水流動場の変遷に着目している。建設の影響がどの程度継続するかについては、サイトの推理地質特性に大きく依存する。ストーリーボードでは、定量的な記述ではなく、処分場の周辺環境が影響を受ける可能性のみを記述することとした。地下研究施設での多くの調査・評価で、このような影響は事実として報告されている。また、処分場が閉鎖されるときに設置されるプラグの役割や、地下水の動きと物質の動きにも着目した記述をしている。

ファーフールドでのストーリーボードでは、変遷がゆっくりと進むこともあり、数万年以降の気候変動と、テクトニクスによる隆起および侵食作用に着眼した地下水流動場等環境の変化を記述している。そして、将来的な隆起・侵食により、地下に埋設された高レベル放射性廃棄物が、地表環境に接近する様子を図化している。尚、第2次取りまとめでは、線量のピークが発生するまで廃棄物は地表に達せず、初期と同じ天然バリアの性能を維持することを標準ケースとして設定した。

初期のストーリーボードでは、このように処分全体を俯瞰する目的で、想定される変遷プロセスと放射性核種の動きを1枚の図に示し、各時間枠での課題が網羅的に示されている。

(5) 第二世代のストーリーボード

第一世代のストーリーボード作成時（2000年前後）から、現在までの知見の蓄積と処分事業実現に向けての動きに伴い、セーフティケースに関する議論が活発になってきた。このような動きを踏まえ、新たに第二世代のストーリーボード作成への研究を開始した。ストーリーボードでは、前述の統合したセーフティケースへの反映とセーフティケースの最重要課題である「理解の醸成：コンフィデンス・ビルディング」のための社会との接点も意思し、多くの関係者への普及も意図し、

作成方法について以下に示す具体的な手順とルールを設定した。第二世代のストーリーボードの具体的な作成例と適用例については、5.2 節で記述する。

- ・ストーリーボード作成の前提の整理
- ・評価の時間領域の設定
- ・評価の対象領域の設定
- ・マトリクスで記載事項とレベルの設定
- ・状態変遷図作成のルール

a. ストーリーボード作成の前提の整理

ストーリーボード作成に入る前に、以下の事項について、作成時点で入手できている情報と知見を整理するとともに、各分野の専門家へのヒアリングから得た情報や知見、公表された報告書および調査や試験等を通じて得られたエビデンスなどを収集する。情報や知見の解釈については、ストーリーボード作成作業を通じて情報源に確認をしていく。このような前提を整理する作業プロセスもまた、その内容の確認を含めて、ストーリーボード作成の一部として専門家の意見を集約することになる。

- ・処分場が立地する地質環境の把握：現状と将来の変遷に関する情報
- ・安全概念の整理：閉鎖前の安全性と閉鎖後安全性確保（多重バリアシステムなど）
- ・処分場概念の特徴整理：処分場のレイアウト、人工バリアシステム、建設・操業・閉鎖概念など
- ・期待する安全機能の整理：核種閉じ込め性、移動抑制、隔離など想定する安全概念に基づき、それぞれのシステム構成要素に期待する機能を整理する
- ・規制からの要件：サイト選定要件、安全審査指針、安全レビュー、閉鎖要件、安全指標、制度的管理など
- ・社会的な要件：回収可能性、閉鎖時期の選択など

b. 評価の時間枠の設定

評価の時間枠は、着目する安全機能に対応して設定されるため、評価の対象により考慮すべきタイムスケールが異なってくる可能性がある。立地サイトの地質条件、処分概念、安全機能に依存するが、ストーリーボード作成では、以下の時間枠を議論の出発点として設定する。

- ・処分場建設前の時間枠：擾乱のない初期状態として設定する期間

- ・ 処分場の建設・操業・埋め戻し・閉鎖までを対象とした時間枠：最大で 100 年程度
- ・ 処分場が閉鎖され事業が停止になるまでの時間枠：最長で 300 年程度
- ・ 放射性核種の完全な閉じ込めの時間枠：高レベル放射性廃棄物処分では、オーバーパックで 1000 年間の閉じ込めを設計
- ・ 次期の氷河期の影響が想定できる時間枠：10,000 年オーダー
- ・ テクトニクスに起因する天然事象の予測が可能な時間枠：100,000 年オーダー
- ・ 処分場が隆起・侵食作用により地表近辺の酸化領域に近接する時間枠：サイトの特性と処分深度に依存
- ・ 一つの種が生存する時間枠：1,000,000 年オーダー

c. 評価領域の設定

評価領域の設定も時間枠と設定と同様に、立地する地質環境の範囲（スケール）、人工バリアや処分場のレイアウトの規模、想定する核種移行経路の長さや形態などの情報をもとに決定される。また、評価上着目する安全機能の対象とスケールにも依存する。初期の段階でのストーリーボードでは、以下のような領域を出発点とする。

- ・ 人工バリア領域：掘削領域も含めた人工バリアの構成要素が記述できるスケール
- ・ 処分場領域：処分場のレイアウト全域やアクセス坑道が記述できるスケール
- ・ 天然バリア領域：処分場を含む流出点までの地下水流動系が記述できるスケール
- ・ GBI 領域：生物圏と天然バリアとのインターフェースを記述できるスケール。記述が天然バリアに含まれる場合もある
- ・ 生物圏領域：評価の対象となる人間が居住する想定される環境を記述できるスケール

d. 各マトリクスで記載事項とレベルの設定

時間領域と評価領域で規定されるマトリクスの枠内での記載事項は、安全機能に関連する変化や変質、および状態変遷を記述することを原則とする。マトリクス内に記述する事項は、前提条件として整理した情報をベースに記述していくことになり、関連する分野の専門家が同席して議論することが基本となる。この作業は、FEP を抽出する作業と類似するが根本的に異なる点は、閉鎖前からの場の変遷に着目していること、安全機能に着眼していること、時間枠と評価領域の連続性を考慮した議論を行う点である。以下に主な作業内容を列記する。

- ・ マトリクス作成に参画する専門家の選定：地質・地質構造の変遷、地下水流動、地化学、岩

盤力学、人工バリア設計、処分場の建設、操業、埋め戻し、人工バリア材料の変質、放射性核種移行、気候変動、生物圏等に対応

- ・基本案の作成：セーフティケースへの反映を考慮したストーリーボードの役割を考慮し、たたき台を作成し、どのような前提と情報をベースにしたかを専門家に説明
- ・時間枠と評価領域の境界と連続性の議論：EZD や GBI の状態変化や核種の挙動についての議論、特に生物圏の変遷については、気候変動との関連もあり記述のレベルを含めての事前の整理が必要
- ・不確実性の記述：マトリクス作成において専門家間での議論のうち、不確実性に関する内容を留意事項として記述しておく。これらの不確実性の要因や特性についての記述についても添付資料として整理しておく

e. 状態変遷図作成のルール

マトリクス内には、最終的に議論の結果を受けて状態変遷の代表的な模式図を記述することとする。図化をはかることで、処分の安全性で着目している重要なプロセスや事象を、他のステークホルダーへのメッセージとして伝えることができる。また、生物圏の変遷を同じ書式で表示することで、社会的な接点となる現世代の時間枠と安全性で着目しているタイムスケールの違いへの理解を図ることができる。安全性が潜在的なリスクの議論に終わらないようにするための工夫が必要とされる。以下に今回作成時に適応した代表的なルールを示す。

- ・議論に基づくその時間枠での代表的な変遷や核種移行の図とすること
- ・各マトリクスの図は変遷の連続性を考慮して作成する
- ・変遷のレベルが分かるように図化する、変質の進展を色分けや点線で示す
- ・安全機能の要素（例：人工バリアの構成要素）は区別ができるように色分けする
- ・動きのある状態（例：地下水流動やガスの挙動、核種移行）は、矢印などでその方向性も示す
- ・変遷図にはできうる限り説明文を記述しない、視覚イメージを重視

f. 留意点の記録

ストーリーボードの各時間枠の議論において不確実性の存在や、意見の一致が見られなかった内容などを留意事項として記録しておく。ストーリーボードは、作成の初期段階では、多くの疑問点や不明点が存在し、その後の情報や知見を集約することで改良されていく。その進展の記録は、

判断や意思決定のプロセスとして極めて重要となる。

これまで、各種のストーリーボードを作成してきた経験から強調しておきたい点は、ストーリーボード作成では、最新の情報と知見にサポートされることが求められるが、出発点では、処分全体の挙動に関する知見に基づいて、全体像を把握し俯瞰できることが基本である。

【参考文献】

- 1) OECD/NEA (1999): Scenario Development Methods and Practice, An Evaluation based on the NEA Workshop in Scenario Development, Madrid Spain
- 2) OECD/NEA (2002): The handling of Timescales in Assessing Post-closure Safety, Lesson learnt from the April 2002 Workshop in Paris, France
- 3) OECD/NEA (2006): Engineered Barrier System (EBS) in the Safety Case: Design Confirmation and Demonstration, Workshop Proceeding Tokyo, Japan
- 4) 核燃料サイクル開発機構 (2005) : 平成 17 年取りまとめの公表と今後の研究開発の方向性 : 地層処分技術に関する研究開発報告会

5.2 ストーリボードの適用

本節では、セーフティケース構築の出発点として、ストーリボードを適用した以下の研究事例をもとに、開発目標としたストーリボードの適用性について考察する。

- ・ 余裕深度処分におけるセーフティケース構築とストーリボードの活用
- ・ 高レベル放射性廃棄物処分におけるシナリオ解析でのストーリボードの活用
- ・ 人工バリアの初期品質要件設定におけるストーリボードの活用

5.2.1 余裕深度処分におけるセーフティケース構築とストーリボード

本節では、ストーリボードの適用実績として、青森県六ヶ所村で計画されている余裕深度処分のセーフティケース構築に使用した研究例を記述する。セーフティケースについては、第2章で示した OECD/NEA (2004) の考え方を踏襲している。ストーリボードは、余裕深度処分での安全機能に着目し、閉鎖前の安全性と品質確保から、閉鎖後の核種のピークが発生するまでの期間を対象に作成した。

(1) 余裕深度処分の概念

余裕深度処分は、図 5.2.1-1に示す地表から約 100mに直径 19m程度の処分空洞を建設し、原子力発電所の解体廃棄物および使用済み燃料の再処理プロセスから発生する放射性廃棄物（L1廃棄物）を埋設処分する施設である。余裕深度処分は、IAEAの処分形態の分類からするとShallow Land Disposal（浅地中処分）に属する。

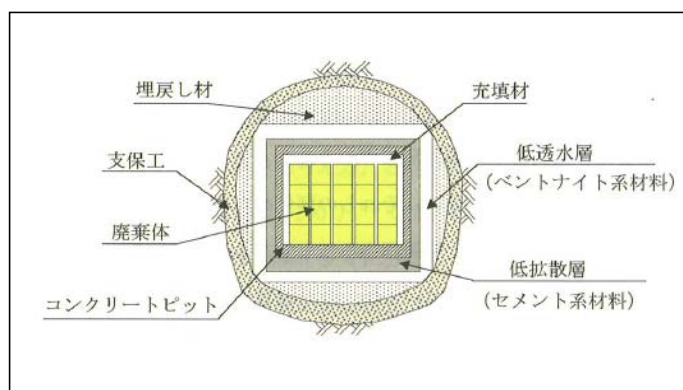


図 5.2.1-1 余裕深度処分場の概念 (土木学会 2008)

(2) 余裕深度処分におけるセーフティケース

余裕深度処分のセーフティケースは、以下に示す大きく二つの論拠で構成されている。

- ・ 閉鎖前までの安全確認
- ・ 閉鎖後の安全機能に着目した安全評価

閉鎖前までの安全確認は、既存の低レベル放射性廃棄物埋設施設（1, 2 号埋設処分）で規定された施設確認を踏襲し、施設の安全性と使用を長期の安全機能に着目して実施する方策である。対象となる安全機能は、主として、埋設作業中の遮蔽、熱対策、人工バリアシステムによる核種の閉じ込めと移行抑制の機能となる（土木学会, 2008）。

処分事業停止後の安全性については、高レベル放射性廃棄物処分と同様の安全評価で示すことを主眼に、人工バリアの安全機能と天然バリアの核種移行遅延機能や、深度 100m の隔離距離、および核種が将来的に放出される沢と沼での希釈を組み合わせた多重バリアシステムをセーフティケースとしている（土木学会, 2008）。これら閉鎖前後の安全機能評価を網羅的に行うための検討作業の最初の段階でストーリーボードが活用された（Kawamura et al, ICEM2007）。

余裕深度処分のストーリーボードは、閉鎖前および閉鎖後のセーフティケース構築作業を視野にいれ作成した。閉鎖前のセーフティケース構築では、施設の安全確認に主眼を置き、原子炉等規制法で要求される保安規定への反映を考慮して、処分の各段階で確認すべき事項について調査・分析した上で、閉鎖にいたるまでのストーリーボードを作成し、着眼点と留意点を取りまとめた。

閉鎖後のセーフティケース構築では、安全評価で着目する安全機能をベースにストーリーボードに反映した。以下にその詳細を記述する。

(3) 閉鎖前の施設確認とストーリーボード

(i) 低レベル放射性廃棄物埋設処分での「施設確認」について

1, 2 号埋設事業での施設確認は、事業主体が項目、内容、確認方法を定めた後、国に提出し承認を受け実施されている。施設確認は以下に示す埋設事業の手順に従い、実施する内容を規定しており、主眼は埋設施設におかれている。

- ① 構築：基礎地盤掘削完了→岩着コンクリート→排水管設置→底盤構築→側壁構築→仕切壁構築→ポーラスコンクリート設置→仮蓋設置
- ② 定置：廃棄体定置
- ③ 充てん・覆い：充てん材充てん→敷きモルタル→上部ポラコン→覆いコン打設
- ④ 点検路：点検路構築

⑤ 覆土：ベントナイト混合土覆土→上部覆土

定置された廃棄体の状態、処分前のピット内の水の確認、構造物の厚さ、強度、透水係数など多種・多様に具体的な確認対象範囲が規定されている。しかし、低レベル廃棄物処理施設に対する確認は、バリアとしての機能確認ではなく、廃棄物を格納する構造物として、また段階的な制度的管理のために設計された施設としての所定の仕上がり状況を確認するレベルに留まっている。

(ii) 原子力安全委員会が要求する「安全確認」

原子力委員会は「高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方（第1次報告）：平成12年11月6日」の中で安全確保方策として以下を求めている。

第2章 安全確保原則

高レベル放射性廃棄物の処分の安全性を長期に亘って確保するためには、地層処分にとって適切な地質環境を有する処分地が選定（サイト選定）され、人工バリア及び処分施設から構成される処分場がそこに適切に設計・施工（工学的対策）される必要がある。

このため、地層処分の安全確保に当たっては、処分を行う者が自ら安全確保に努力することはもちろんであるが、安全確保のための措置が適切であって、長期に亘って人間とその生活環境に対してその影響が及ぶおそれがないことをあらかじめ確認することが必要である。

高レベル放射性廃棄物の処分の安全性は、以下によって確保される。

①① 長期的安全確保方策

高レベル放射性廃棄物は、低レベル放射性廃棄物と比較して、放射能の濃度が高く、半減期が極めて長い放射性核種を含むため、例えば、長期的に安定な地質環境を選定するなど、常に長期的な観点から安全性に影響が及ぶおそれのある因子に配慮しつつ、安全確保のための対策（サイト選定、工学的対策）を講じることが必要である。

書式変更：箇条書きと段落番号

②② 安全評価等による安全確認

地層処分に対する安全確保を図るためには、処分事業の各段階でそれぞれの安全確保対策の妥当性について確認することが必要である。これらの安全確認のうち、最も早い段階で行われるものである事業許可申請時における安全確認は、安全評価によって行う。

書式変更：箇条書きと段落番号

第5章 高レベル放射性廃棄物処分に係る安全規制

第2節 建設・操業段階等における安全確認の考え方

高レベル放射性廃棄物の処分においては、安全評価の結果が確実に担保されるように、建設、操業等の各段階において「安全確認」を行うことが重要である。さらに、操業段階が終了した後は、処分場を完全に閉鎖するとの考え方が地層処分の概念であるため、処分場閉鎖時の「安全確認」も重要である。

また、処分場においては、立地段階から事業廃止に至るまで、各段階に応じたモニタリングや巡視・点検等を実施することが必要である。

上記の安全確保方策の確認として規定される安全確認は、図 5.2.1-2に示す処分事業の 4 つの段階での安全確認を求めている（原子力安全委員会）。

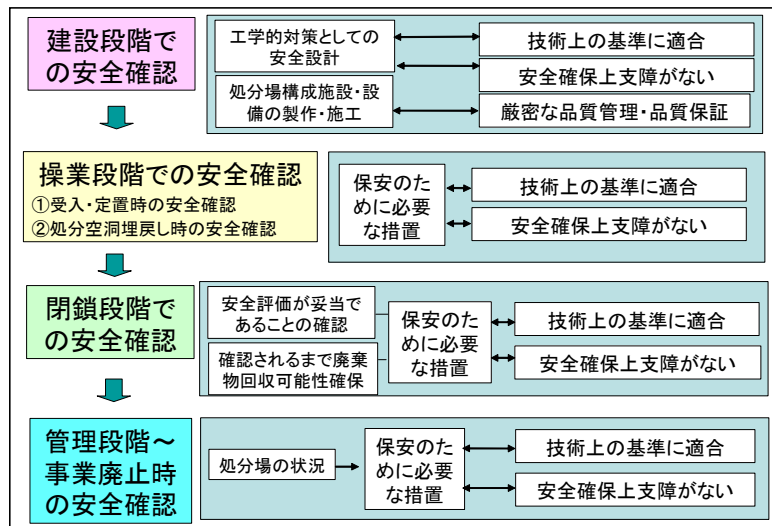


図 5.2.1-2 事業廃止段階までの安全確認（原子力安全委員会 2000 年）

建設段階での安全確認は、工学的対策の安全設計として、地下空洞の安定性、地下水やガスの対策、火災等への対策等が技術上の基準に適合しており、将来規定される地下の原子力施設に関連する技術上の基準を満足する。そして、それらの工作物が安全確保上支障がなく、長期の安全機能を確認する観点からの要件も満足することが求められる。また、処分場の構成施設・設備の製作・施工に関わる人工バリア材の製作や定置等では、厳密な品質管理・品質保証が行われ、将来策定される人工バリアの、安全機能を確認するための品質管理基準等を満足することの確認を求めている。

作業段階では、廃棄物の受入れ・定置時の安全確認と処分空洞埋戻し時の安全確認を求めている。両者には、作業時の放射線に対する安全性とともに、埋設される廃棄物の仕様確認や定置作業時の品質確認も含まれる。尚、作業時の安全性と品質確保については、4.1 節：閉鎖前のセーフティケースの構築に関する研究で記述した。

閉鎖段階での安全確認として要求される、安全評価が妥当であることの確認、および確認されるまでの廃棄物回収可能性の確保の両要件は、事業主体が処分場を閉鎖する条件として最も重い

規定である。前者の安全評価の妥当性について、余裕深度処分に関する安全規制では、閉鎖前確認の要件として安全レビューと呼ばれる規定が提示された（第二種埋設事業規則 2008）。後者の要件は、処分場が閉鎖されるまで技術的に廃棄物が回収できることを求めている。

以上に挙げたように、余裕深度処分の事業化検討においては、高レベル放射性廃棄物処分で規定された、処分事業停止までの段階的な安全確保の考え方にに基づき、1, 2 号埋設事業との整合性を考慮して原子力学会標準化委員会で検討が進められている。

(iii) 低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に係わる安全規制について（中間報告）（案）平成 19 年 3 月 20 日総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会 廃棄物安全小委員会

余裕深度処分に対する施設の設計・建設の確認について、下記の事項を要求している。

(2) 余裕深度処分施設の設計・建設の確認等について

余裕深度処分は、廃棄物埋設地の天然バリア及び人工バリア並びに付属施設から構成され、原子力委員会の「現行の政令濃度上限値を超える低レベル放射性廃棄物処分の基本的考え方において」示されているように、「放射性核種の処分施設から生活環境への移行は人工バリアと天然バリアの組み合わせによって防止または抑制される」ものである。

人工バリアについては、立地地点の天然バリアに応じて適切に設計・施工されることが必要であり、安全審査において天然バリアの機能や人工バリアの基本設計の妥当性を確認することになる。そしてその後、建設・埋設段階では、その基本設計が適切に反映されていることを確認することになるが、処分空洞等を掘削することによって施設設備位置のより詳細な地質等の情報を追加して得ることができ、その状況に応じた適切な人工バリアが具体的に施工されることになるため、人工バリアの施工については、その技術上の基準への適合の確認を施設確認によって行うことが適当である。また余裕深度処分の人工バリアは、透水性の低い材料等の使用も見込まれることからそれらを含めて、施設確認の際の人工バリアの技術基準を埋設規則等に新たに定めることが必要である。

その他の余裕深度処分施設（付属施設）についても、従来の低レベル放射性廃棄物の埋設施設と概ね類似の施設であるため、施設確認によって技術上の基準への適合の確認を行うことが適当である。

上記の規定は、前述した高レベル放射性廃棄物（HLW）の安全確保の基本的考え方を踏襲し、許認可時の審査要件、建設・埋設段階での設計と施設確認、新たに得られる情報を用いた安全評価のレビューを求めている。既存の 1,2 号埋設事業における閉鎖までの施設確認の規定、HLWでの段階的な安全確認の考え方、および余裕深度処分における事業停止までの確認事項について、処分事業の段階的な展開を考慮し、ストーリーボードとして図 5.2.1-3 に示す。この図は初期段階において、学会等での議論に用いられたものである。

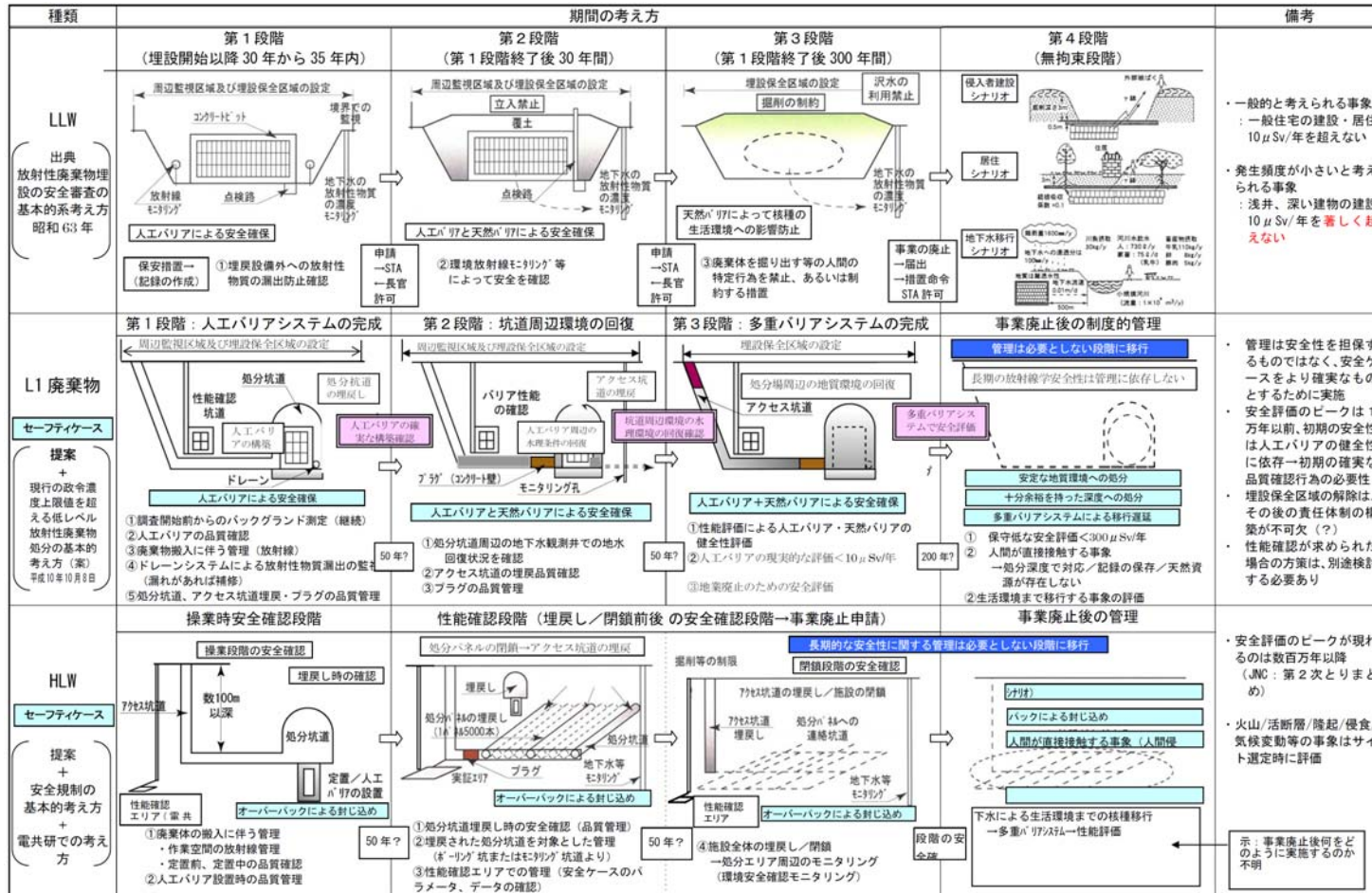


図 5.2.1-3 事業停止までのストーリーボード

(iv) 余裕深度処分における「建設・埋設段階での施設確認」のあり方（提案）

余裕深度処分では、安全審査により天然バリアの機能と人工バリアの基本設計の妥当性が確認され、その後の建設・埋設段階で、基本設計の実施状況を確認する。また、IAEA が提唱する閉鎖後のセーフティケースの確認につなげるためにも、建設・埋設段階での安全確保方策の妥当性確認についての具体的な方策が必要となる。尚、作業時のセーフティケースでは、作業時の安全性確認も含まれるが、これらは保安規定として別途検討されることになる。建設・埋設段階での施設確認には、従来の施設確認と比較して以下の2つの特徴がある。

① 人工バリアに係わる施設確認の新たな設定の必要性

- ・ 所定の設計仕様に従って人工バリアが構築されていること：施工前の材料と設置環境の確認、施工中の周辺環境と品質管理、施工後の仕様と品質確認
- ・ 閉鎖までの期間、人工バリアを含む周辺岩盤の挙動を把握し、安全レビューに反映するためのデータが取得されていること

② 閉鎖後のセーフティケースの中核をなす安全評価へのインプット

- ・ 処分場周辺の地質環境の建設・作業中の変遷に関する情報が得られていること：処分空洞周辺の間隙水圧の変化、天然バリア中の地下水流動特性の変化および地化学特性の変化の把握
- ・ 人工バリアの安全機能の確認：直接・間接的な方法でモニタリングされる人工バリアの安全機能の把握

上記の観点からの閉鎖前確認を、表 5.2.1-1 に示すように、閉鎖前のセーフティケース構築のためのストーリーボードとして整理した。このストーリーボードでは、縦軸に閉鎖にいたるまでの段階的な建設・作業手順を図式化して示し、施設確認と安全確認の項目で想定される行為を記述している。

人工バリアに対する安全機能の確認の必要性については、処分場の閉鎖の是非を判断する論拠の一つとして、米国やスイス等で議論されている。余裕深度処分のように人工バリア機能に長期の安全性を依存する場合、長期挙動に関するシナリオの妥当性は、審査の段階で大きな議論となる可能性が高い。上記の基本設計の妥当性を示すことについて、施設確認は具体化における重要な役割を果たすとして議論されている。しかし、初期の施工品質が保証されれば、長期の健全性が確保される、あるいは長期挙動の予測の信頼性が確保できるとする論拠については、まだ十分準備されていない。

施設確認と平行して、長期挙動予測の不確実性を削減する方法として、原位置での実規模、もしくは工学規模での挙動確認実証試験が計画されている。人工バリア設置後、初期段階での事象

とプロセスに対する挙動を直接的に把握すれば、安全審査段階での設計の妥当性の論拠として、また長期的には処分空洞の埋め戻し、閉鎖段階の意思決定の判断根拠として活用可能である。

表 5.2.1-1 余裕深度処分の閉鎖前のセーフティケースとストーリーボード：施設確認と安全確認

<div><div>施設確認：1, 2 号での実績を踏まえ、建設された施設が所定の設計品質基準を満足していることを確認する行為。その方法、手順、箇所数、データ処置などは施設確認プログラムとして準備される。取得されたデータの多くは安全確認の情報として用いられる。</div><div>安全確認：多重バリアシステムによるセーフティケースの一環として、人工バリアシステムの初期施工品質の確認、周辺岩盤の処分場建設・操業等の影響確認と事業停止段階までのそれらの安全要素の変化を確認し、安全評価（モデル、パラメータ）にフィードバックすることで、セーフティケースとする。</div></div>				
作業段階	ストーリーボード	施設確認：設計仕様（品質）の検査	安全確認：セーフティケースへの対応	備 考
空洞掘削段階		【空洞掘削中】 モルタル吹付前 <ul style="list-style-type: none">岩盤表面観察：基礎岩盤としての亀裂性状、地下水浸透状況、岩層の変化、地耐力確認 【岩盤掘削後】 鋼製支保、モルタル吹付後 <ul style="list-style-type: none">支保材、材料の使用前検査、施工中の品質管理空洞内空検査：変位・変形量の空間分布、応力・ひずみ連続測定（一定の間隔）地下水浸透状況確認（カ所、状況）	安全確認の項目： <ul style="list-style-type: none">人工バリア周辺岩盤の健全性確認支保設置後の内空変位を測定：支保外部のEDZの範囲を部材の発生応力、変形状態からモデルにより推定する（モデルの妥当性は調査坑道での観測データを適用）	母岩の健全性を確認する指標の設定が必要とされる。原子力施設としては、地耐力と地震時の安定性に夜照査が実施されている。
二次覆工段（ライニング＋側部底部コン打設		【二次覆工前】 防水膜、ドレーンシステム設置 <ul style="list-style-type: none">防水シート材料の使用前検査、施工中の品質管理シート設置後水漏れ検査ドレーンシステムの設置確認設置後検査 【二次覆工＋側底部埋戻しコン打設】 <ul style="list-style-type: none">材料の使用前検査、施工中の品質管理コンクリート表面検査：亀裂、漏水内空検査：寸法、仕上がり精度	安全確認の項目： <ul style="list-style-type: none">品質管理の一環で実施される出来形検査結果は、初期の品質を保証する情報として用いられる。（長期の挙動評価の所期条件として活用）母岩としてのある広がりを考慮した安定性・健全性の確認は、周辺坑道掘削時に実施	安全評価上、人工バリア周辺の埋戻し領域の取り扱いが明確でない。なんらかの性能が要求された場合、安全確認の対象となる。
底部人工バリア構築段階		【底部低透水性層施工】 <ul style="list-style-type: none">施工前周辺環境検査・施工中の環境モニタリング（不具合の検知・修復）、材料の使用検査、施工中の品質管理完成後の精度、品質確認：密度空間分布、初期含水比 【底部低拡散層施工】 <ul style="list-style-type: none">材料の使用前検査・施工中品質確認（サンプリング）打設後の品質確認（特性、精度、ひび割れ）	安全確認の項目： <ul style="list-style-type: none">低透水性層の施設確認として取得された品質確認データ（密度・初期含水比の空間分布と厚さ）は、長期評価の初期品質としてのインプットとなる。低拡散層の施設確認として取得された品質確認データ（特性値、ひび割れ分布特性）は長期評価のインプットとなる。	品質確認のための指標と許容レベルは、事前の長期評価から目標値を設定する必要がある。
人工バリア・ビット構築段階		【処分用コンクリートビット構築】 <ul style="list-style-type: none">材料の使用前検査、施工中の品質管理完成後の内空検査、ひび割れ分布検査 【側部低拡散層構築】 <ul style="list-style-type: none">材料の使用前検査、施工中の品質管理完成後の品質確認	安全確認の項目： <ul style="list-style-type: none">ビット構築後、廃棄体定置に備えての使用前確認が実施される。使用前確認の方法、指標等については別途保安規定として規定される。	廃棄体定置前の施設確認として、ビット、人工バリアの健全性確認が要求される。
廃棄体定置段階		【操業用の設備・機器の設置】 <ul style="list-style-type: none">設備・機器の使用前機能確認 【廃棄体の搬送・定置時】 <ul style="list-style-type: none">廃棄体の搬送前健全性確認搬送ルート安全性確認（安全設備および監視）定置時のモニタリング（異常・不具合・事故への対応）廃棄体の定置位置の状態確認	安全確認の項目 <ul style="list-style-type: none">定置前廃棄体確認（廃棄体ごとの認識：数量内容物、インベントリー）定置時の廃棄体位置確認と健全性確認（搬送定置時のモニタリング、検査結果を反映）	廃棄体容器に対する要求能に依存。操業中の核種閉じ込め性要求の場合、操業中の放射線モニタリングによる機能確認が必要となる。
内部充填・遮蔽コン打設		【内部充填モルタル施工時】 <ul style="list-style-type: none">施工前の材料確認、施工中の品質管理充填度の確認（内部空隙の存在） 【上部遮蔽コンクリート施工時】 <ul style="list-style-type: none">施工前の材料確認、施工中の品質管理施工後の出来形確認	安全確認の項目 <ul style="list-style-type: none">基本的に充填材と遮蔽コンクリートが所定の品質で構築されていることの確認。施設確認の情報で確認する。	充填及び遮蔽コンクリートを打設する事で廃棄体の回収が技術的に困難となる
人工バリア構築段階		【側部低透水性層の構築】 <ul style="list-style-type: none">施工前の材料確認、施工中の品質管理、施工後の品質確認 【上部コンクリートビット構築】 <ul style="list-style-type: none">施工前の材料確認、施工中の品質管理 【上部低拡散層の構築】 <ul style="list-style-type: none">施工前の材料確認、施工中の品質管理完成後の品質確認（ひび割れなど） 【上部低透水性層の構築】 <ul style="list-style-type: none">・施工前の材料確認、施工中の品質管理、施工後の品質確認	安全確認の項目 <ul style="list-style-type: none">人工バリアの初期品質に関する情報は、構築前、構築中、構築後の品質関係データを活用する。	
分空洞埋戻し段階		<ul style="list-style-type: none">埋戻し前の材料品質確認、残置物の確認施工中の品質管理（完成後の直接的な確認が不可能のため、完成後の確認は、施工中の品質管理でカバーする）	安全確認の項目 <ul style="list-style-type: none">埋戻しの了解を得るために以下の情報の確認を実施する。 処分空洞に関する情報 廃棄体に関する情報 人工バリアに関する情報	廃棄体の回収性は困難になる。埋戻しと平行して
処分空洞シール段階		【底部のドレーンシステムの閉鎖】 <ul style="list-style-type: none">施工前の材料確認、施工中の品質確認（充填圧管理） 【アクセス坑道のプラグ設置】 <ul style="list-style-type: none">施工前の材料確認、施工中の品質確認	安全確認の項目 <ul style="list-style-type: none">プラグへの要求機能と安全評価上の扱いに依存する。	ドレーンの充填についての事前の確認試験が必要
周辺坑道埋戻し段階		【アクセス坑道の埋戻し】 <ul style="list-style-type: none">施工前の材料確認、施工中の品質確認	安全確認の項目 <ul style="list-style-type: none">周辺坑道の評価上の扱いに依存。周辺岩盤と同様な性能を期待された場合、品質に関する高度の確認が必要となる。	

(4) 閉鎖後のセーフティケースとストーリーボード

余裕深度処分を対象にセーフティケースを議論する初期段階における、サイト固有の場の変遷と処分システム全体の俯瞰的な理解のために、シナリオ設定の一環としてストーリーボードを作成した。ストーリーボードは、閉鎖後を対象とした安全評価における出発点となるFEPの抽出やシナリオ構築に適用されている。ストーリーボードで考慮する評価の時間枠については、安全評価の指標との関連を考慮し、図 5.2.1-4に示す5段階の時間枠（ゾーン）を設定した（Kawamura et al. 2005）。縦軸は性能目標値として個人の年間被ばく線量：シーベルト（Sv）／年、横軸は処分場閉鎖後の時間枠を示している。

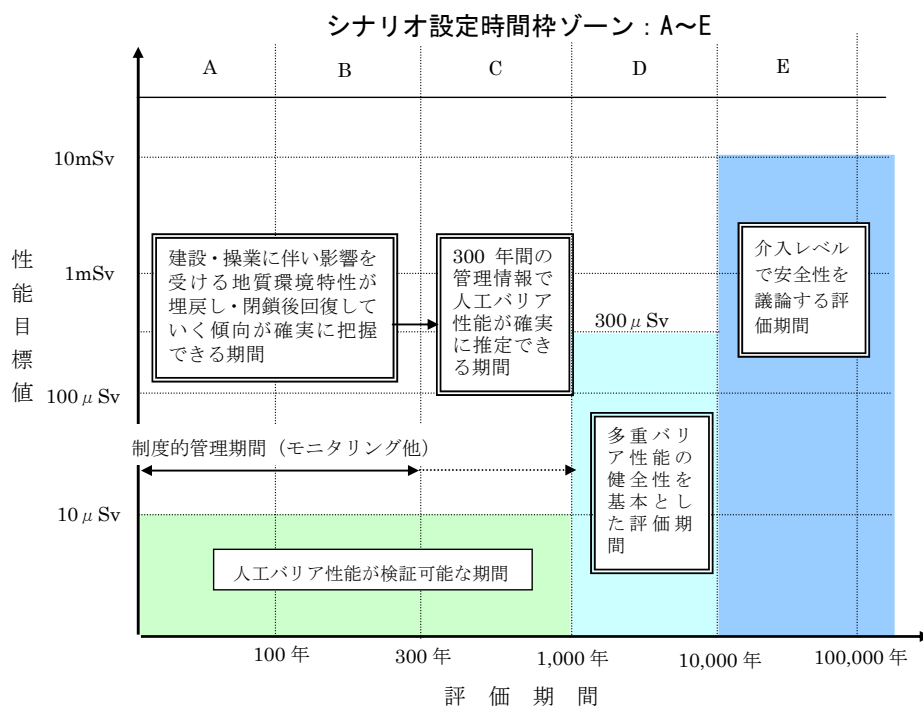


図 5.2.1-4 安全指標と時間枠の概念（Kawamura et al. 2005）

評価の時間枠設定では、建設と操業により影響を受けた水理環境が回復する期間として閉鎖後100年間、制度的管理が継続される期間として300年間、人工バリアの性能が確実に推定できる期間として1,000年間、多重バリアによる放射性核種の確実な閉じ込め（遅延を含む）期間として10,000年、その後の数10万年以降の期間に分割している。

ストーリーボードの評価領域は、安全評価での対応を考慮して、ニアフィールド、処分場領域、ファーフィールド、生物圏に分類している。ニアフィールドには人工バリアと掘削影響領域(EDZ)を含めている。

図 5.2.1-5に作成したストーリーボードを示す。このストーリーボードは、第一世代のHLWのストーリーボードと比べ、以下の特徴がある。

- ・人工バリアが複雑な構造となっているため、状態変遷の記述は、ゾーン D(10,000 年後)に至るまで複雑な相互作用が考慮されている
- ・処分場スケールの変遷では、閉鎖前の建設による処分周辺の地下水流動場の変動に着目している。余裕深度処分では、深度が 100m 程度で処分場規模が 300m 程度あるため、掘削に伴う地下水の排水の影響が地表近辺までに及ぶと推定され、初期の安全評価に大きな影響を及ぼす可能性がある
- ・隆起・侵食作用と気候変動により、処分場が地表に近接し、酸化領域に接する可能をストーリーボードで示唆している。酸化環境では放射性核種の溶解度が増大することから、長期の安全評価結果に影響を与える
- ・生物圏は、隆起侵食と気候変動の影響を受け、大きく変動する現象を生物圏モデルで記述している

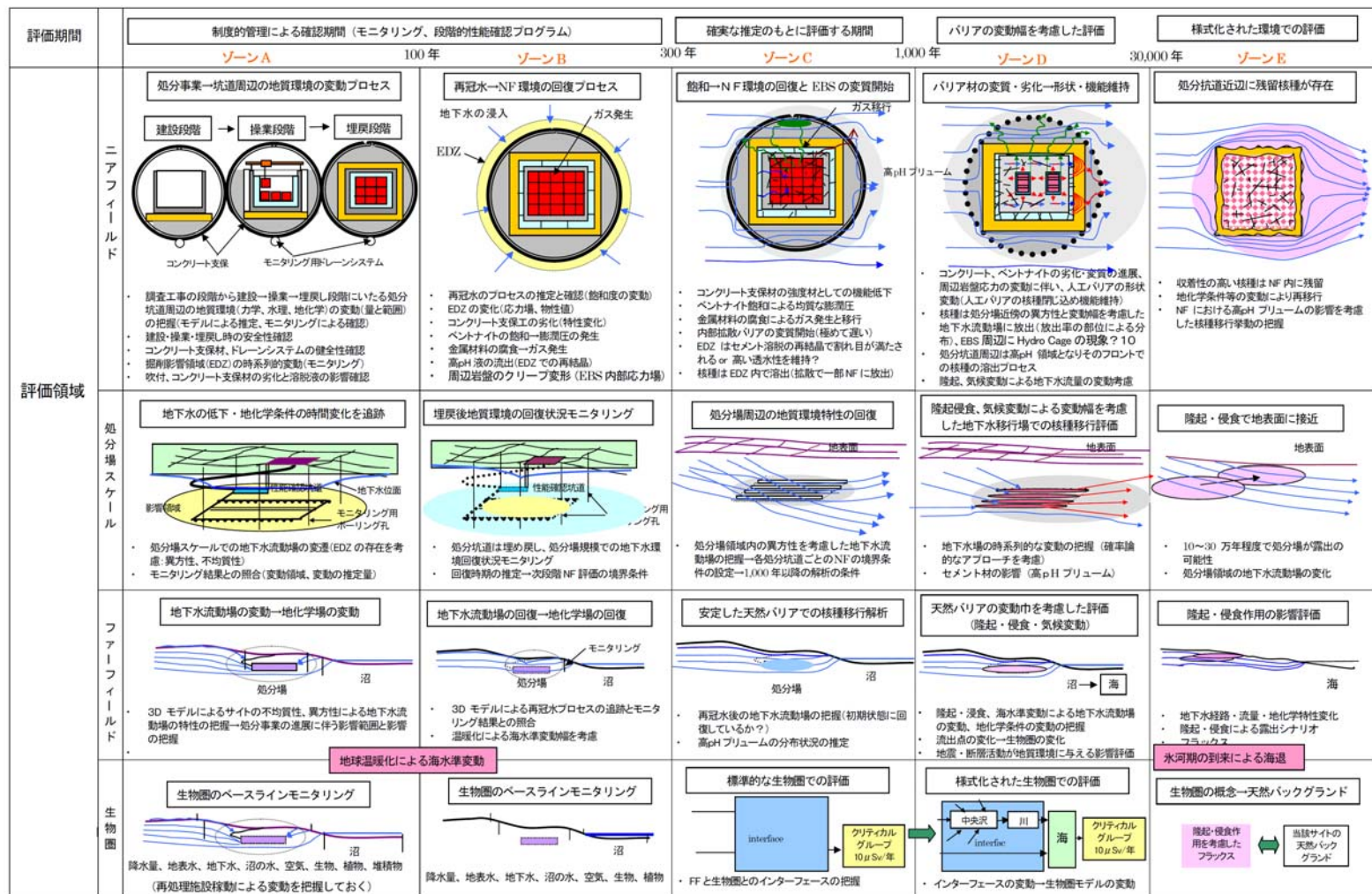


図 5.2.1-5 余裕深度処分を対象にしたストーリーボードの適用性

(5) まとめと今後の展開

本節では、許認可申請準備を進めている余裕深度処分プロジェクトに対する、長期安全評価の出発点となる場の状態変遷の理解のために、ストーリーボードを活用した事例を示した。長期安全性を確保するための安全機能が、評価の時間枠でどのように機能するのかを場の状態変遷とともに包括的に把握可能であり、さらに状態変遷に関する様々な分野の専門家が議論する共通のプラットフォームとしての役割を果たすことができた。

このような評価の初期段階でのストーリーボードの適用は、その後の学術委員会や規制主体への説明と議論でも用いられ、開発の目標であったステークホルダーとの理解を共有するインターフェースとして役割も確認できた。

今後は、許認可の申請に向けて、処分システムの安全機能がどのように発揮されるのか、定量的な評価結果を示す前提として、ストーリーボードの積極的な活用が期待されている。

【参考文献】

- 1) 原子力安全委員会 (2000) : 高レベル放射性廃棄物放射性廃棄物の処分に係わる安全規制の基本的考え方について (第 1 次報告)
- 2) 原子力安全・保安部会 廃棄物安全章委員会 (2008) : 低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に係わる安全規制について (中間報告)、総合資源エネルギー調査会
- 3) 土木学会エネルギー委員会低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会 (2008) : 余裕深度処分の安全評価における地下水移行シナリオに用いる核種移行パラメータ設定の考え方
- 4) Hideki Kawamura, Neil Chapman, Charles McCombie, Ian McKinley (2005): Staffing and monitoring for the Japanese L/ILW repositories, Proceeding of ICEM'05
- 5) Forum vera (2000): Radioactive Waste Management- Sustainable or Tentative Solution?, Switzerland
- 6) US NRC 10CFR Part63, (2007): Performance Confirmation Program

5.2.2 安全評価シナリオとストーリーボード

本節では、セーフティケースの中核をなす HLW 処分における、安全評価のシナリオ設定にストーリーボードを適用した研究事例を記述する。

(1) 研究の背景：新しいシナリオ設定手法開発の必要性

安全評価のシナリオ設定の方法については、1980 年代の後半から OECD/NEA のシナリオワーキンググループが、システムティックなシナリオ設定と称した共通手法の開発に取りかかった。システムティックとは、安全評価に関連する全ての因子 (FEP) を抽出し、その因子からボトムアップで系統的にシナリオを構築しようとする試みを指す (OECD/NEA, 1990)。その手順は以下のように示された。

- ・ FEP (Feature : 特質、Event : 事象、Process : プロセス) の抽出
- ・ 人工バリア、天然バリア、生物圏などの評価領域や天然事象による FEP の分類
- ・ 一次スクリーニングとして、サイトの特性、処分概念、廃棄物に含まれる放射性核種の種類などを考慮して安全評価上考慮する必要のない FEP を除外
- ・ FEP 間の関連図 (PID : Process Influence Diagram) を作成
- ・ PID の重要性和発生頻度の設定
- ・ 二次スクリーニングとして重要度が低く、発生頻度の小さい PID を除外
- ・ PID を組み合わせて複数のシナリオを構築
- ・ 組み合わせたシナリオを影響の大きさや蓋然性を指標として分類とスクリーニング
- ・ シナリオ分類：基本シナリオ、変動シナリオ、破壊シナリオ、人間侵入シナリオ、What if シナリオなど

上記の手順は、広く各国で試みられたが、PID の作成からシナリオ構築にいたるプロセスで膨大な数の組み合わせが発生したため、シナリオのスクリーニング段階で専門家の判断が多数必要となり、最終シナリオを設定するプロセスに透明性と追跡性が欠如する結果となった。

(2) シナリオ解析のワークフレームの構築

システムティックなシナリオ設定の手法構築が十分機能しなければ、セーフティケースの根幹をなす安全評価の信頼性が疑われてしまう。本節では、シナリオ設定に対し、透明性と追跡性を有するワークフレームの構築を通じて、ストーリーボードを適用した事例を紹介する。

(i) 前提と境界条件

シナリオ設定のワークフレーム構築に際し、以下の前提と境界条件を設定した。

- ・シナリオ設定のワークフレームの対象は、HLW の地層処分とする
- ・処分場閉鎖後の長期安全性評価についてのシナリオ解析とし、処分場の建設・作業段階での影響が評価に関連する場合、影響因子として考慮できるフローを検討する
- ・ワークフレームは、許認可申請時でのシナリオ解析ワークフレームを目標とし、現段階でのワークフレームは、将来的に安全評価戦略に統合化され、段階的に展開されるサイト選定に従い詳細化されていく
- ・許認可時のワークフレーム構築段階では、規制側から以下の事項が提示されていると考える
 - －安全評価に関する基本的考え方（安全指標、防護基準など）
 - －許認可申請への要件、コンプライアンスを示す基準
- ・規制側も安全指標とレベルに従い、審査のための安全評価シナリオを独自に設定していると仮定する

(ii) シナリオ解析ワークフレーム構築の背景と現状

第2次取りまとめでJNCが実施したシナリオ解析では、当時国際的に適用されていたFEPをベースとする標準的な手法を採用した。本研究では、この手法をボトムアップ・アプローチと呼ぶ。ボトムアップ・アプローチによるシナリオ構築は以下の手順による。

- ・OECD/NEAのFEPリストをスタートラインとし、HLW処分特有のFEPデータベースを構築
- ・作成したFEPについて、特徴を考慮してバリア要素ごとに分類
- ・安全性と関連性を専門家の判断により考慮し、FEPのスクリーニング
- ・FEP相互の関連図（PID）を作成
- ・グルーピングしたFEPをシナリオ設定した上で、地下水移行シナリオ、接近シナリオの2つに分類

原子力安全・保安部会報告書「高レベル放射性廃棄物処分の安全規制に係わる基盤確保に向けて」（平成15年）では、上記の2つの主要なシナリオを出発点に規制側としてのFEPリストをその相関図とともに提示した。平成12年に原子力安全委員会が公表した「高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方（第1次報告）」においても同様に、地下水移行シナリ

オと接近シナリオが重要なシナリオとして記述された。この報告書では、長期の安全性を確保する方策として、処分事業の各段階での安全確保および安全評価による確認が提言されている。安全委員会では長期評価に伴う不確実性の存在を認識しているが、評価の期間には言及していない。評価の基本は、評価線量値の最大値が放射線防護レベルを超えないことである。そのため、安全評価の信頼性は、シナリオ設定の妥当性と説得性に大きく依存することになる。

(iii) ワークフレーム構築に向けての考慮事項

シナリオ構築に関しては、国際的に標準化された方法は存在しない。各国とも IAEA が提示した FEP リストを参照した独自の方法で対応しており、規制側との間に安全規制の解釈等についての議論が頻繁に実施されている。わが国における規制側の関与は、許認可申請時のみであり、HLW 処分における公募方式でサイト選定を進めていく途中段階では、規制側との公式な接点は存在しない。この状況を改善するには、初期段階での規制側への本ワークフレームを基本とした安全評価戦略の公表等の情報発信が不可欠である。

さらに、他の放射性廃棄物処分における、シナリオ構築との整合性を考慮しなければならない。特に許認可に向けたヒアリングの準備を進めている、余裕深度処分事業の現状を把握しておくことが重要である。現在、原子力学会の標準化委員会で準備されている、余裕深度処分を対象としたシナリオ構築において、専門家間で議論された事項に十分留意しておく。すなわち、新たにワークフレームを構築した場合、余裕深度処分との差異についての考察が要求されるため、相違を意識しつつ検討を進める必要がある。

シナリオ設定において、原子力安全委員会と保安院の JNFL に対する要求は、シナリオ構築プロセスとシナリオ同定における、透明性（説明性）と追跡性（連続性）の確保と、明確な文書化である。すなわち、長期の評価及び安全指標に対応した評価シナリオの信頼性と蓋然性ととともに、安全性に関連する重要な事象の網羅性が求められている。以上の要件を受け、ワークフレーム構築検討では、従来の FEP をベースにボトムアップでシナリオ構築を試みる方法に代わるアプローチを目指すものとする。

第2次取りまとめおよび近年の海外での安全評価において、FEP の作成は、実証され文書化された知見と専門家の判断に基づいて、処分システムの理解度をまとめるために、最初に行う作業と位置付けられている。事業の初期段階では、情報量が限られるため、FEP 作成に不完全さが含まれることを許容するものである。しかしながら、国際的な FEP リストとの比較により、妥当

性と網羅性が検証できるとされている。このような比較プロセスは、透明性を持って実施できることから、規制側も容易にレビューすることができる。新しいワークフレームでもこの検証プロセスを初期段階で導入する。

新しいワークフレームでは、サイト固有の条件のほかに、規制や社会・経済的な要件を考慮して、セーフティケースが構築され、それに基づき処分システムの安全機能が設定される。これらの作業は、シナリオ構築の初期段階で想定する処分システムの理解（System understanding）として実施される。このシステムの理解に基づき、全体の状態変遷を俯瞰するストーリーボードが評価の時間枠と評価領域を考慮して作成される。ストーリーボードを作成する過程での専門家による構造化された議論（Structured argumentation）を通じて、安全性に関連した要素（Nagra、スーパーFEP）が抽出され、蓋然性を考慮して時系列的にスーパーFEPをくみ上げたものがシナリオとして設定される。本検討では、このようなプロセスを「トップダウン・アプローチ」と呼び、これまでの経験から、実用性と要求される透明性と追跡性を兼ね備えた方法と判断している。本検討では、トップダウン・アプローチをワークフレームの基本として検討する。

ストーリーボード作成作業では、安全性に寄与する処分システムの全ての要素に対して、専門家による明確で整合性の取れた変遷に関する変遷イメージを持つことが必要である。さらに、セーフティケースの中で考慮した科学技術的な観点だけでなく、実施段階での規制側や社会的な要求についても勘案しておく必要がある。これらのセーフティケースからストーリーボード構築までの作業は構造化アプローチの一環として実施することで、透明性は確保できると考える。専門的な判断の推移および、規制側や社会からの要請の変化に対応できるように、シナリオ構築のメインフレームでフィードバックのプロセスを導入する。その際の判断指標については、今後試解析で設定していく。

以上の観点から、シナリオ解析のワークフレーム構築では以下の事項に重点をおく。

- ・ サイト固有の条件を考慮して作成するセーフティケースにより、処分場概念を構築することから作業は開始する。一連の作業を通じて「システムの理解」を図る。理解したシステム全体を俯瞰するためにストーリーボードを導入し、安全性確保に係わる重要な問題点を様々な分野の専門家との議論で記述していく
- ・ 処分システムを構築する要素ごと（モジュール）に分割し、それらについて詳細なストーリーボードを作成する。ストーリーボードでは状態変遷を熱（T）、水理（H）、力学（M）、化学（C）に分割して記述する。この段階での記述内容は、並行して準備される FEP の知識情報ベースを参照することでの網羅性と、セーフティケースとシステムの理解に基づき設定される着

目し、安全確保に係わる重要な現象（スーパーFEP）となる。

- ・モジュールごとに作成される詳細なストーリーボードをベースに、安全機能を評価するうえで重要となるスーパーFEPを抽出する。抽出したスーパーFEPの起こりやすさ（蓋然性）を関連するFEPの知識情報ベースを用いて推定したのち、ストーリーボードの時間枠に沿い連続性を考慮して蓋然性の高いスーパーFEPを貼り付けて行く作業を行う。この作業では、最初のストーリーボードによる処分システムの状態変遷の理解の深さが鍵となる。
- ・安全性に関連するFEPとトップダウンで構築されるシナリオとの連携は、シナリオとしてスーパーFEPを組み立てていく段階で確認することができる。

(iv) ワークフレーム構築の基本的考え方

HLW 処分プロジェクトは、文献調査から概要調査段階、そして精密調査段階を経て安全審査を中心とする許認可申請まで、段階的な進め方が計画されている。各段階においてその時点でのサイト固有の情報と規制側からの要件および社会・経済的な制約のもとにセーフティケースが構築される。シナリオ設定は、このような段階的な進展に伴って構築されるセーフティケースをベースに作成されることになる。前述したように、安全評価のシナリオは、規制からの要件である安全指標とそのレベルに対するコンプライアンスの程度を定量的に示すことが主目的であるため、評価の対象は、放射性核種の人間環境までの移行に集約される。ストーリーボードでの状態変遷を背景に最も蓋然性の高い核種移行プロセスを記述することがシナリオ構築のゴールとされる。

シナリオ解析全体のワークフレームは、FEPをベースとしたボトムアップ・アプローチとストーリーボードをベースとしたトップダウン・アプローチから構成され、各々補完性と整合性が確保できる連携を設定する。このような方法を本検討では「ハイブリッド・アプローチ」と呼ぶ。

設定したシナリオの正当性を照査するには実際にはFEPだけでなく、規制側からの要件、社会的な要件なども考慮する必要がある。また、FEPについても、初期の国際的なFEPリストとの照査だけでは不十分であり、構造化アプローチでのR&D計画に従い知識ベースへの要件も考慮した上で、妥当性を評価するフィードバックを導入する。

余裕深度処分で議論されている事項については、視野に入れるが、今後の事業の段階的な進め方を考慮し、様々な要件の変化に対応できる柔軟性を有する以下の2つのアプローチをワークフレームとして構築する。

- a. ボトムアップFEP構築ライン：安全性に関連するFEPと、サポートする多方面の知識ベー

ス (Multiple lines evidence) を構築するライン。ここでの一連の流れと作業は、シナリオ解析を支援する研究開発ベースで展開され知見が蓄積されていく。その優先度は原環機構が設定する評価シナリオの重要度に依存する。

- b. トップダウン・シナリオ構築ライン：処分システム全体を構成するサブシステムに着目し、安全機能に関連するサブシナリオを同定し、評価ケースを構築するライン。許認可段階でのワークフレームでは、今後策定される安全要件や基準、セーフティケースに柔軟に対応できるトップダウン・アプローチをシナリオ構築の機軸とする。

(v) ワークフレームの構築

以上の考察から、図 5.2.2-1 にストーリーボードをベースとしたトップダウンのアプローチと、FEP をベースとしたボトムアップのアプローチを結び付けた「ハイブリッド・アプローチ」のワークフレームを示す。シナリオ構築の基本的な作業は、ストーリーボードが主軸となり、FEP はその網羅性を保証する役割と位置づける。ストーリーボードを中心とした作業のイメージを図 5.2.2-2 に具体例を含めて記述する。

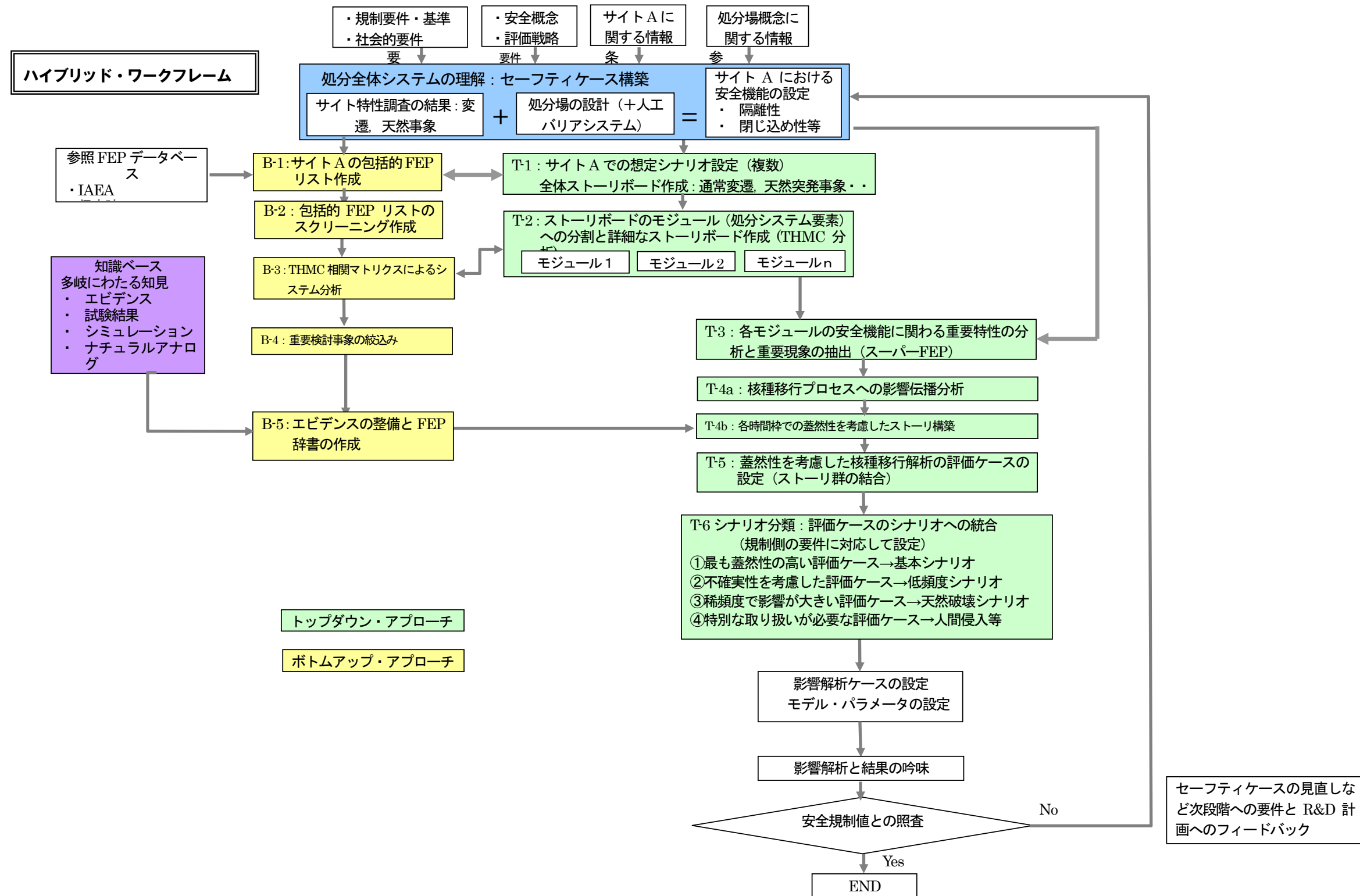


図 5.2.2-1 シナリオ解析のハイブリッド・ワークフレーム：ストーリーボードを主軸に FEP をサポート的な位置づけ

(3) ストーリーボードの構築

ストーリーボードは、ワークフレームに示された上位のシステム理解に基づき、システム全体の状態変遷をイメージした上で作成する。本適用性研究では、仮想サイトを設定し、以下の手順でストーリーボードを構築した。

- ・ストーリーボード作成の前提の整理
- ・評価の時間領域の設定
- ・評価の対象領域の設定
- ・マトリクスで記載事項とレベルの設定
- ・状態変遷図作成

(i) 前提の整理

【仮想サイト設定】 処分場の仮想サイトとして、図 5.2.2-3に示す沿岸内陸地を地質の専門家に依頼し設定した。この地域は、年間の隆起量が $0.3\text{mm}/\text{年}$ 程度で、海岸に接していることから氷河期には海退により海岸線が変化する。また地表から 100m 深度までが酸化域となっている。

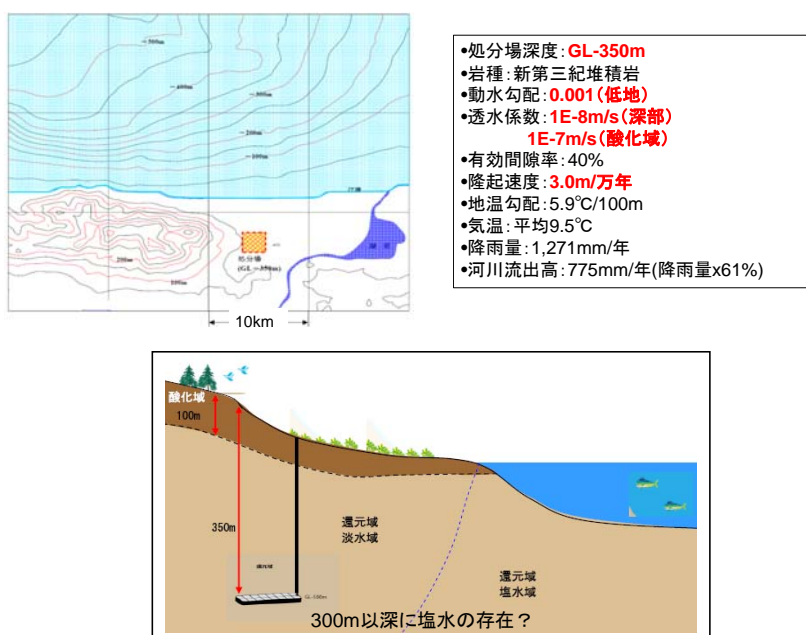


図 5.2.2-3 ストーリーボード作成の対象とした仮想サイト

【処分概念と処分場の深さ】処分場の概念は図 5.2.2-4に示す平面配置（原環機構、2004）とし、人工バリアの概念は、緩衝材にベントナイトブロックを用いた処分孔堅置きとする。仮想サイトの岩盤強度等より、処分場の深度は 350m と仮定した。以上の設定から、処分場は隆起・侵食作用により、約 117 万年後に地表に露頭することになる。

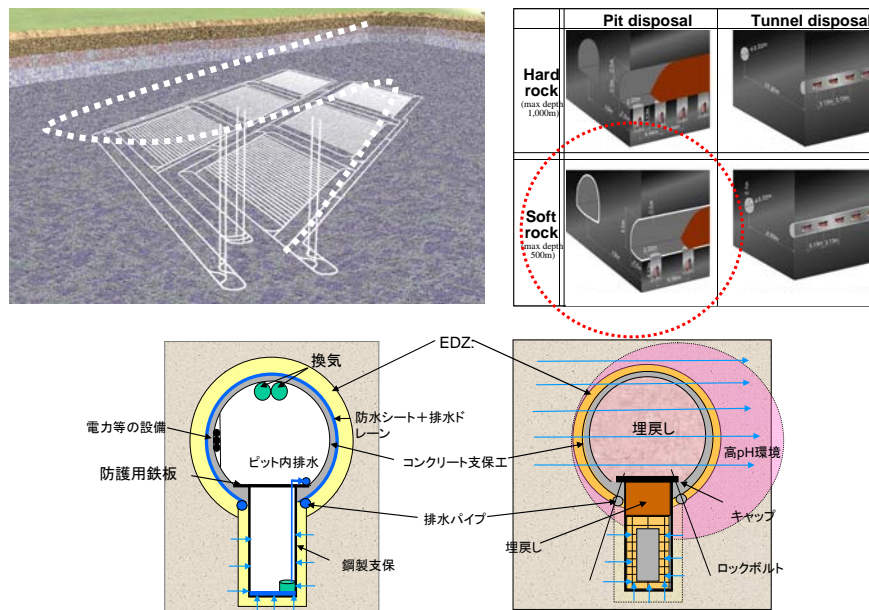


図 5.2.2-4 ストーリーボードで対象とする処分場概念と人工バリア概念（堆積岩、堅置き）

【セーフティケースと安全機能】想定サイトでの処分場概念構築において設定したセーフティケースは、処分場は、火山活動や断層活動により処分システムが崩壊することのない地質環境の長期安定性が確保されたサイトに設置され、人工バリアによる、1000 年までの完全な核種閉じ込めと、それ以降の核種移行遅延機能を有するベントナイト緩衝材と天然バリアによる多重バリアシステムで放射性核種の人間環境への移行量が抑制されるとする。

(ii) 評価の時間枠と評価領域の設定

【評価の時間枠の設定】ストーリーボード作成のルールに従い、評価の時間枠は以下の 8 つの枠組みとした。

- ・建設前段階：地質環境の初期状態（評価上のベースライン）
- ・建設後閉鎖までの段階：処分場の建設・操業により周辺の地質環境状態が影響を受ける段階
- ・閉鎖後 300 年までの段階：人工バリアのベントナイト緩衝材が飽和にいたる段階

- ・ 300 年後から 1,000 年までの段階：建設・操業による地下水流動場への影響が回復し、ガラス固化体からの温度影響がなくなる段階
- ・ 1,000 年後から 10,000 年までの段階：オーバーパックスの閉じ込め機能が喪失し、核種がガラス固化体から溶出する段階
- ・ 10,000 年後から 100,000 年までの段階：次期の氷河期が到来し、海退・海進の状態が発生する段階
- ・ 100,000 年後から露頭する 117 万年後までの段階：処分場が隆起・侵食により酸化域に達し、露頭する段階
- ・ 117 万年後以降

【評価領域の設定】ストーリーボード作成のルールに従い、以下の 4 つの領域を設定した。

- ・ 人工バリアスケール
- ・ 処分場スケール
- ・ 天然バリアスケール
- ・ 生物圏（地表水文系）

以上の設定に従って、横軸に評価の時間枠、縦軸に評価の領域としたマトリクスを作成し、それぞれの枠内に想定される状態の変遷を記述しストーリーボードを作成した（図 5.2.2-5 参照）。

ストーリーボード作成に当たっては、5.1.2 節で設定したルールに従い、全体像を作成した上で、分野の異なる専門家（地質・地質構造、水理地質、地化学、土木工学、材料学、安全評価）を集め、ブレインストーミングにより全体の見直しを行い構築した。

本ストーリーボードは、第一世代のストーリーボードと比較し、以下の点が考慮されている。

- ・ 仮想サイトでの評価時間枠に対応した変化をストーリーボードの上覧に記述することで、評価領域の様々なスケールでの境界条件が明確に理解できる。
- ・ 人工バリアの周辺の残置される要素であるコンクリート支保工、鋼製支保工、埋戻し材等を考慮したことで、人工バリアの構成要素、特にベントナイト緩衝材へのコンクリートからの高 pH プリユームの影響に与える影響を記述している。
- ・ 処分場周辺の地下水流動の状態を、隆起・侵食作用を考慮して記述している。
- ・ 仮想サイトでの隆起・侵食作用を考慮した場の変遷、特に、処分場が酸化域に到達し、地下水の化学環境が大きく変化することによる影響を記述している。

- ・上記の場の変遷に伴う放射性核種移行の観点から、異なる領域での包括的な移行プロセスを記述している。
- ・その他の天然事象として、評価の時間枠で考慮すべき事象を記述している。
- ・留意事項として、安全評価上での取り扱いで考慮すべき事項を記述している。

全体を俯瞰するストーリーボード作成に引き続き、ストーリーボードを構成する評価の領域として人工バリアとその周辺の状態変遷に着目した詳細なストーリーボード（モジュール）を作成した。図5.2.2-6に示したモジュールでは、横軸の時間枠は、全体のストーリーボードを踏襲し、縦軸に、人工バリア構成要素とその周辺の要素を枠組みとした。それぞれの枠組みの中で想定される状態変遷を、熱（T）、水（H）、応力（M）、化学（C）に分類して記述した。この段階での記述は、上位にある全体のストーリーボードでの記述、および別途設定されているFEPでの記述との整合性を考慮している。

全体のストーリーボードと同様に、枠内に記述されている状態は、これまでの知見から、蓋然性の高い事象やプロセスを結びつけて記述した。例えば、「地下水浸入→ベントナイト再冠水→膨潤圧の発生」等の表現を用いている。THMC に分割して記述することで、想定される事象とプロセスの相関関係を時系列的に整理することができる。これらの特徴は、FEP をベースにシナリオを構築する場合に表現できない点であり、ストーリーボードを用いることで、分野の異なる専門間での意思疎通の場を提供でき、プラットフォームとしての役割を確認することができた。また、ストーリーボードの中に、議論の結果として各時間枠での不確実性にも言及するとともに、サイト固有の天然事象についても記述することで、処分場全体での状態変遷とその影響因子の関連、および安全機能に着目したプロセスレベルでの議論（モジュール）も可能となった。このようなストーリーボードの作成を通じて、処分の安全性を論じるシナリオ構築プロセスの透明性と網羅性が確保できる見通しが得られた。

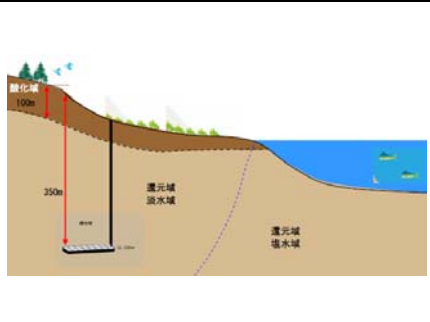
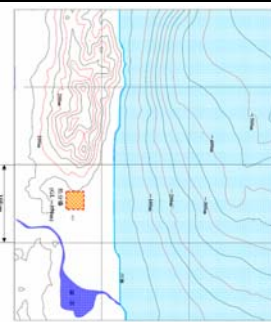
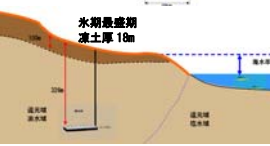

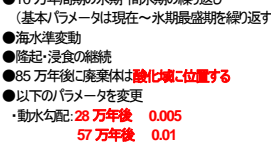
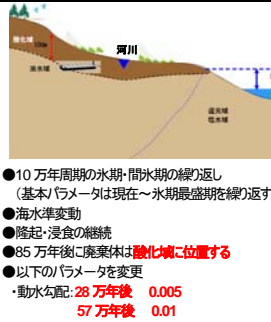
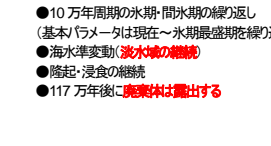
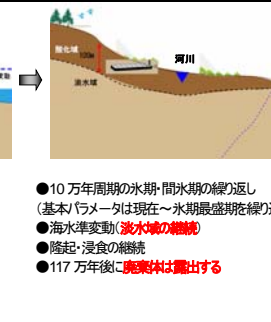
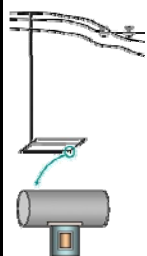
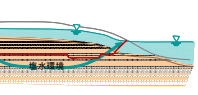
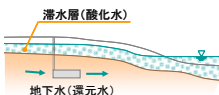
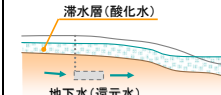
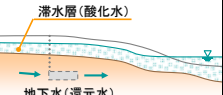
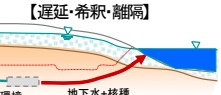
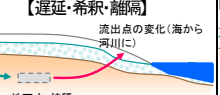
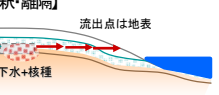
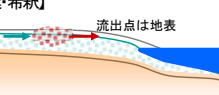
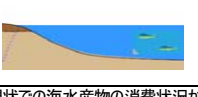
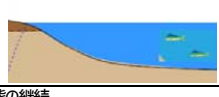
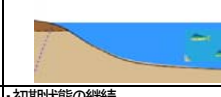
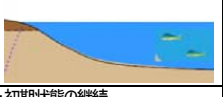
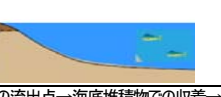
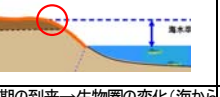
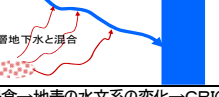

		初期状態から1,000年					1,000～10,000年	10,000～100,000年	100,000～1,170,000年		
	場の理解	<div></div> <div>基本パラメータ（現在）</div> <ul style="list-style-type: none">●処分場深度: GL-350m●岩種: 新第三紀堆積岩●動水勾配 0.001（低地）●透水係数: 1E-8m/s（深部） 1E-7m/s（酸化域）●有効間隙率: 40%●隆起速度: 3.0m/万年●地温勾配: 5.9℃/100m●気温: 平均9.5℃●降雨量: 1,271mm/年●河川流出高: 775mm/年(降雨量×61%)					<div></div> <div>水期最盛期 凍土厚 18m</div> <div>基本パラメータ（氷期最盛期）</div> <ul style="list-style-type: none">●岩種: 新第三紀堆積岩●動水勾配 0.001（低地）●透水係数: 1E-8m/s（深部） 1E-7m/s（酸化域）●有効間隙率: 40%●隆起速度: 3.0m/万年●地温勾配: 5.9℃/100m●海水準: 現在125m●気温: 平均2.2℃●降雨量: 782mm/年（現在×62%）●河川流出高: 500mm/年（降雨量×64%）●凍土厚さ: 18m	<div></div> <ul style="list-style-type: none">●10 万年周期の水期・間水期の繰り返し（基本パラメータは現在～水期最盛期を繰り返す）●海水準変動●隆起・浸食の継続●85 万年頃に廃棄物は酸化域に位置する●以下のパラメータを変更<ul style="list-style-type: none">・動水勾配: 28 万年後 0.005 57 万年後 0.01	<div></div> <ul style="list-style-type: none">●10 万年周期の水期・間水期の繰り返し（基本パラメータは現在～水期最盛期を繰り返す）●海水準変動（淡水域の継続）●隆起・浸食の継続●117 万年頃に廃棄物は露出する		
<div>処分概念</div> <div>陸地処分(350m)</div> <div>堆積岩</div> <div>処分場(第2次取りまとめでのレイアウト)</div> <div>廃棄体設置方式</div> <div></div>	人工バリアスケール	建設前	掘削中	EBS 定置中	埋戻し中	閉鎖後～300年	300年～1,000年	1,000～10,000年	10,000～100,000年	100,000～1,170,000年	1,170,000年以降
	処分場深さにおける状態	初期応力: 7MPa 間隙水圧: 3.5Mpa 地温: 30℃	【オーバーバックによる閉じ込め】 ・掘削→EDZの発生→間隙の増大、応力緩和→透水性の増加 ・覆工背面での排水→不飽和領域の発生 ・オーバーバックからの発熱→ベントナイトの温度上昇 ・ベントナイトへの再冠水→膨潤圧発生 ・岩盤のクレープ変形→岩盤応力の回復 ・埋戻し部への再冠水→EDZ 不飽和領域の回復	【オーバーバックによる閉じ込め】 ・廃棄体の発熱→ベントナイト温度上昇 ・再冠水→間隙水圧の回復→ベントナイトの膨潤 ・岩盤のクレープ変形→岩盤応力の回復 ・支保工の劣化→高 pH フリュームの発生 ・間隙増加→透水性増大	【オーバーバックによる閉じ込め】 ・地下水のオーバーバック接触→腐食→ガス発生→ベントナイト中の移行 →腐食膨張→ベントナイト変形 →腐食生成物→ベントナイトの変質 ・岩盤クレープ変形→応力の回復 ・支保工の劣化→透水性の増大	【閉じ込めと遅延】 ・地下水のガラス固化体に接触 →ガラスガラス固化体の溶解→核種の浸出→ベントナイト中の拡散移行（収着）→EDZ／埋戻し中への移行（拡散・希釈・収着） ・オーバーバックの腐食→腐食膨張／腐食生成物→ベントナイトの変形 →ガス発生→ベントナイト中の移行 ・支保工の劣化→高透水領域の発生／高 pH フリュームの発生→岩盤／ベントナイトの変質	【遅延】 ・地下水のガラス固化体に接触 →ガラスガラス固化体の溶解→核種の浸出→ベントナイト中の拡散移行（収着）→EDZ／埋戻し中への移行（拡散・希釈・収着） ・支保工の劣化→高透水領域の発生／高 pH フリュームの発生→岩盤／ベントナイトの変質	【遅延】 人工バリア内(埋戻し・EDZを含む)の核種残存 ・酸化領域への接触→溶解度上昇→残存核種の溶解移行	人工バリアスケールのイメージなし		
	処分場深さにおける状態	初期応力: 7MPa 間隙水圧: 3.5Mpa 地温: 30℃ 塩水の存在(古海水?)	・建設・操業中の排水→アクセス坑道、処分坑道周辺の間隙水圧の減少、地表近辺の地下水面の低下 ・オーバーバックの発熱→処分場全域での温度上昇 ・埋戻し→再冠水→間隙水圧の回復 ・埋戻し→処分場周辺応力場の回復 ・プラグ設置→地表への地下水経路の遮断	・オーバーバック発熱→処分場周辺の温度上昇→熱対流の発生 ・再冠水→処分場周辺の間隙水圧の回復 ・支保工の劣化→坑道周辺の高透水領域の発生→坑道に沿った地下水流動 ・支保工の劣化→高 pH フリュームの発生	・地下水は処分場内の高透水ゾーンを優先的に移動 ・熱の影響の提言 ・コンクリート支保工の劣化→坑道に沿った地下水流動の卓越 ・高 pH 環境の形成	【遅延・希釈・離隔】 ・ガスの FF への移行 ・核種の NF からの放出(地下水移行)	【遅延・希釈・離隔】 ・核種の FF への継続した放出	【遅延・希釈・離隔】 ・酸化地下水領域への接近→化学環境の変化→地下水流量・速度の増大 →残存核種の溶解→天然バリアへの移行	【遅延・希釈】 ・地表面への接近と露頭 →地表水による残存核種の溶出→地表水との混合		
	天然バリアスケール	 〔隆起・侵食速度: 平均 0.3mm/年〕	 潜水層(酸化水) 地下水(還元水)	 潜水層(酸化水) 地下水(還元水)	 潜水層(酸化水) 地下水(還元水)	【遅延・希釈・離隔】  塩水環境 地下水・核種	【遅延・希釈・離隔】  流出点の変化(海から河川に) 地下水・核種	【遅延・希釈・離隔】  流出点は地表 地下水・核種	【遅延・希釈】  流出点は地表		
	地表面水文系	 現状での海水産物の消費状況が基本となる	 初期状態の継続	 初期状態の継続	 初期状態の継続	 地下水の流出点→海底堆積物での収着→海水による希釈→現状の生態系維持	 氷河期の到来→生物圏の変化(海から河川に) →凍土の発生→地表面系の変化→生態系の変化	 隆起・侵食→地表面の水文系の変化→GBIの変化(表層水との混合)→地表面系生物圏(氷河期のサイクリックな到来による変化)	 露頭→地表面水と河川利用を考慮した生物圏		
その他の天然事象		火山・断層・泥火山・マスムーブメントの可能性は、数 10 万年無し	火山・断層・泥火山・マスムーブメントの可能性は、数 10 万年無し	火山・断層・泥火山・マスムーブメントの可能性は、数 10 万年無し	火山・断層・泥火山・マスムーブメントの可能性は、数 10 万年無し	火山・断層・泥火山・マスムーブメントの可能性は、数 10 万年無し	火山・断層・泥火山・マスムーブメントの可能性は、数 10 万年無し	火山・断層・泥火山・マスムーブメントの可能性は、数 10 万年無し	火山・断層・泥火山・マスムーブメントの可能性は、数 10 万年無し	火山・断層・泥火山・マスムーブメントの可能性は、数 10 万年無し	
留意事項			・処分場への残置物の影響把握 ・建設・操業の影響(領域とレベル)の把握 ・海底の堆積物	・再冠水のプロセスと環境回復のレベル ・処分場スケールでの不飽和領域の存在	・オーバーバックの腐食膨張現象	・海底堆積物の特性把握 ・人工バリア周辺の残置物の影響 ・高 pH フリュームの影響	・凍土発生の深さ ・降雨量の低減	・処分場スケールでの核種残存量の推定	・100 万年以降: 新規火山・断層発生の確率・発生時の影響モードと影響 ・処分場スケールでの核種残存量の推定		

図 5.2.2-5 沿岸内陸仮想サイトを対象としたストーリーボード

		建設前:初期特性	掘削中	EBS 定置中	埋戻し～閉鎖	閉鎖後～300 年	300 年～1,000 年	1,000 年～1 万年	1 万年～10 万年	10 万年～117 万年	117 万年以降
EBS の状態変遷と核種移行プロセスイメージ											侵食作用
掘削影響領域 (EDZ)	T	岩盤熱特性	換気による温度低下	換気による温度低下	ガラス固化体の発熱→温度上昇	ガラス固化体の発熱の低下→温度低下	ガラス固化体の発熱の低下→温度低下→岩盤温度	岩盤温度	岩盤温度	岩盤温度	侵食による流出
	H	母岩の水理特性	排水による不飽和領域発生 応力緩和による間隙増加→水理特性の変化(高透水ゾーンの形成)	排水による不飽和領域発生 応力緩和による間隙増加→水理特性の変化(高透水ゾーンの形成)	埋戻しによる再冠水→飽和(移流場) 高透水性ゾーン残置	埋戻しによる再冠水→飽和(移流場) 高透水性ゾーン残置	飽和状態(移流場) 高透水性ゾーン残置→坑道 EDZ に沿った地下水流動	飽和状態(移流場) 高透水性ゾーン→坑道 EDZ に沿った地下水流動	飽和状態(移流場) 高透水性ゾーン→坑道 EDZ に沿った地下水流動	飽和状態	
	M	力学特性、初期地圧	応力緩和→物性変化	応力緩和→物性変化→クリープ変形→応力回復	応力緩和→物性変化→クリープ変形→応力回復	応力緩和→物性変化→クリープ変形→応力回復	クリープ変形→応力回復	剛性低下物性	初期剛性に回復(?)	初期剛性に回復(?)	
	C	還元・中性	換気による不飽和層が酸化	換気による不飽和層が酸化	再冠水による還元回復	再冠水による還元回復	還元、アルカリ	還元、アルカリ	還元、アルカリ	還元→酸化に変化	
	R	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
処分坑道支保工 ・セメント吹付 ・ドレーンシステム ・二次覆工(コンクリート)	T	コンクリート熱特性	地温と坑道内部温度	ガラス固化体からの発熱→温度上昇	ガラス固化体の発熱の低下→温度低下	ガラス固化体の発熱の低下→温度低下→岩盤温度	岩盤温度	岩盤温度	岩盤温度	岩盤温度	侵食による流出
	H	背面排水による不飽和状態	排水による不飽和状態	排水停止→地下水の浸透	地下水浸透→飽和状態	飽和状態(移流場)	劣化による高透水ゾーンの形成と坑道に沿った地下水流動	劣化による高透水ゾーンの形成と坑道に沿った地下水流動	劣化による高透水ゾーンの形成と坑道に沿った地下水流動	劣化による高透水ゾーンの形成と坑道に沿った地下水流動	
	M	岩盤荷重による応力・変形	岩盤荷重による応力・変形	岩盤荷重による応力・変形	クリープ変形→応力増加	地下水の浸透→変質→強度特性の喪失、内外力での変形	地下水の浸透→変質→強度特性の喪失、内外力での変形	変質材料特性:低剛性	変質材料特性:低剛性	変質材料特性:低剛性	
	C	高アルカリ性 換気による酸化領域	地下水の接触→変質(高 pH 間隙水、Ca 溶解) 換気による酸化領域	地下水の接触→変質(高 pH 間隙水、Ca 溶解)酸化	地下水接触→高 pH 間隙水、Ca 溶解、還元、アルカリ	地下水接触→高 pH 間隙水、Ca 溶解、還元、アルカリ	還元、アルカリ	還元、アルカリ	還元、アルカリ	酸化地下水との接触	
	R	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
ベントナイト緩衝材 ・ベントナイト・ブロック (70:30 密度 1.6)	T	熱物性: ガラス固化体の発熱→温度上昇	熱物性: ガラス固化体の発熱→最高温度→耐熱性維持	熱物性: ガラス固化体の発熱→最高温度→耐熱性維持	熱物性: ガラス固化体の発熱減少→温度低下→耐熱性維持	熱物性: ガラス固化体の発熱減少→温度低下→耐熱性維持	周辺岩盤温度	周辺岩盤温度	周辺岩盤温度	周辺岩盤温度	侵食による流出
	H	低透水性: 浸透水と接触→再冠水(飽和プロセス開始)	低透水性: 浸透水の浸入→再冠水(飽和プロセスの継続)	低透水性: 浸透水の浸入→再冠水(飽和プロセスの継続)	低透水性: 浸透水の浸入→再冠水(飽和状態)	低透水性 飽和状態	低透水性→透水性変化 飽和状態	変質による物性変化→透水性変化 飽和状態	変質による物性変化→透水性変化 飽和状態	変質による物性変化→透水性変化(拡散から移流場へ) 飽和状態	
	M	力学特性: 浸透水と接触→膨潤開始→膨潤圧発生 OP の支持強度維持	浸透水の浸入→膨潤開始→膨潤圧発生、OP 荷重→強度、変形特性の維持	浸透水の浸入→膨潤開始→膨潤圧発生、OP 荷重→強度、変形特性の維持	浸透水の浸入→膨潤圧発生(最高膨潤圧)、OP の荷重→強度・変形特性の維持	膨潤圧(地圧・水圧とのバランス)、OP 荷重、腐食膨潤圧、腐食ガス→変形→強度・変形特性の維持	膨潤圧(地圧・水圧とのバランス)、OP 荷重、腐食膨潤圧、腐食ガス→変形→強度・変形特性の維持	膨潤圧の減少(地圧・水圧とのバランス)、変質による物性変化→変形、密度減少	膨潤圧の減少(地圧・水圧とのバランス)、変質による物性変化→変形、密度減少	膨潤圧の減少(地圧・水圧とのバランス)、変質による物性変化→変形、密度減少→流出	
	C	化学特性: 浸透水(高 pH 塩水)との反応、鉄腐食生成物との反応	浸透水(高 pH 塩水)との反応、鉄腐食生成物との反応	浸透水(高 pH 塩水)との反応、鉄腐食生成物との反応	浸透水(高 pH 塩水)との反応、鉄腐食生成物との反応	高 pH 間隙水+腐食性生物による変質→間隙、密度変化(一部)	高 pH 間隙水+腐食性生物による変質→間隙、密度変化(一部)	高 pH 間隙水+腐食性生物による変質→間隙、密度変化	高 pH 間隙水+腐食性生物による変質→間隙、密度変化	高 pH 間隙水+腐食性生物による変質→間隙、密度変化	
	R	放射線→間隙水の分解→ガス発生	放射線分解→ガス発生	放射線分解→ガス発生	放射線分解→ガス発生	放射線分解→ガス発生	—	—	—	—	
オーバーパック: OP ・鋼製オーバーパック (t=190mm)	T	熱特性: ガラス固化体発熱→温度上昇(耐熱性維持)	ガラス固化体発熱→温度上昇(耐熱性維持)	ガラス固化体発熱→温度上昇(耐熱性維持)	ガラス固化体発熱→温度上昇(耐熱性維持)	ガラス固化体発熱減少→温度低下(耐熱性維持)	—	—	—	—	侵食による流出
	H	気液・機密性維持	気液・機密性維持	気液・機密性維持	気液・機密性維持	浸透地下水との接触→気液・機密性の喪失	浸透地下水→腐食→気液・機密性の喪失	浸透地下水→腐食→気液・機密性の喪失	浸透地下水→腐食→気液・機密性の喪失	—	
	M	力学特性: 膨潤圧→耐圧性維持	膨潤圧→耐圧性維持	膨潤圧→耐圧性維持	膨潤圧→耐圧性維持	腐食+膨潤圧+膨潤圧→耐圧性の喪失(形状維持)	腐食+膨潤圧+膨潤圧→耐圧性の喪失(形状維持)	腐食+膨潤圧+膨潤圧→耐圧性の喪失(形状維持)	腐食+膨潤圧+膨潤圧→耐圧性の喪失(形状維持)	腐食+膨潤圧+膨潤圧→耐圧性の喪失(形状維持)	
	C	化学特性: 周辺湿気→表面腐食	周辺湿気→表面腐食	周辺湿気→表面腐食	周辺湿気→表面腐食	地下水と接触→腐食によるガス・生成物の発生→還元性	地下水と接触→腐食によるガス・生成物の発生→還元性	地下水と接触→腐食によるガス・生成物の発生→還元性	地下水と接触→腐食によるガス・生成物の発生→還元性	腐食生成物の残存、還元	
	R	放射線→遮蔽性維持(回収可能性)	放射線→遮蔽性維持(回収可能性)	放射線→遮蔽性維持(回収可能性)	放射線→地下水の分解→ガス発生	放射線→地下水の分解→ガス発生	—	—	—	—	
ガラス固化体	T	崩壊熱→熱特性: 温度上昇	崩壊熱→熱特性: 温度上昇	崩壊熱→熱特性: 温度上昇	崩壊熱→熱特性: 温度上昇	崩壊熱→熱特性: 温度上昇	—	—	—	—	侵食による流出
	H	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	M	発熱→熱膨張→熱応力発生→ひび割れの進展 自重による沈下	発熱→熱膨張→熱応力発生→ひび割れの進展 自重による沈下	発熱→熱膨張→熱応力発生→ひび割れの進展 自重による沈下	発熱→熱膨張→熱応力発生→ひび割れの進展 自重による沈下	発熱→熱膨張→熱応力発生→ひび割れの進展 自重による沈下	地下水との接触+OP の腐食膨張→応力発生→ひび割れの進展(強度低下)	地下水との接触→熱応力発生→ひび割れの進展(強度低下)	変質材料としての特性	—	
	C	化学特性の熱による変化	化学特性の熱による変化	化学特性の熱による変化	化学特性の熱による変化	化学特性の熱による変化	ガラスの溶解 微生物・有機物の存在→劣化変質・溶解度の変化	ガラスの溶解 微生物・有機物の存在→劣化変質・溶解度の変化	酸化水との接触→溶解度の上昇、核種放出	—	
	R	放射線崩壊→損傷 放射線分解→ガス発生	放射線崩壊→損傷 放射線分解→ガス発生	放射線崩壊→損傷 放射線分解→ガス発生	放射線崩壊→損傷 放射線分解→ガス発生	放射線崩壊→損傷 放射線分解→ガス発生	—	—	—	—	

図 5.2.2-6 人工バリアの状態変遷に着目した詳細ストーリーボード (モジュール)

(6) まとめと今後の展開

本節の前半で記述したシナリオ解析のワークフレーム開発では、従来の FEP からスタートするボトムアップ・アプローチと、ストーリーボードを用いたトップダウン・アプローチを統合したハイブリッド・アプローチを提案した。この方法については、海外の安全評価の専門家とのワークショップを通じ、改善を図るとともに、新しいシナリオ解析の手法として合意を得ることができた。ハイブリッド・アプローチの出発点として作成するストーリーボードは、場の状態変遷および放射性核種の挙動を、包括的に理解するために重要な役割を期待されている。特に、本ストーリーボードを用いて実施した試行では、場の状態変遷の総合的な理解とともに、多重バリアシステムの変遷と、核種移行プロセスの状態推定について、異なる分野の専門家が議論を通じて発展させることができた。つまり、ストーリーボードが目標とした、異なる専門家の議論におけるプラットフォームとしての役割が検証できたといえる。

また、人工バリアシステムに着目した詳細なストーリーボードを、THMC の挙動に着目して作成する作業において、異なる時間軸と評価領域での THMC 相互のプロセスの関連を明確にすることができ、従来の FEP をベースにシナリオを組み立てていく作業で、最も透明性の確保が難しかったプロセスを視覚的に理解することが可能となった。提案した手順でストーリーボードを作成することで、セーフティケースの主目的である、アクティブな状態からパッシブ・セーフティへの移行時に着目すべき挙動を把握でき、今後、他のステークホルダーへの説明のインターフェースとして活用できる見通しが得られた。

【参考文献】

- 1) 核燃料サイクル機構(2005)：高レベル放射性廃棄物の地層処分にに関する知識基盤の構築—平成 17 年取りまとめ— 分冊 3 「安全評価手法の開発」
- 2) OECD/NEA (1999): Scenario Development Methods and Practice, An Evaluation based on the NEA Workshop on Scenario Development Madrid, Spain, May 1999
- 3) 核燃料サイクル開発機構 (2005)：平成 17 年取りまとめの公表と今後の研究開発の方向性：地層処分技術に関する研究開発報告会

5.2.3 人工バリアの初期品質評価とストーリーボード

HLW 処分の長期安全性確保において、人工バリアシステムは重要な役割が期待されている。人工バリアシステムの長期の挙動評価の前提となる施工時の初期品質の確保や周辺の定置環境の把握は、工学的なアプローチで達成され、初期品質の時系列的な変遷については、科学的なアプローチが基本的なメカニズムを解明し、モデル化でのシミュレーションや加速試験でのデータを用いて予測されている。本節では、ステークホルダーに分りやすく説明するための手法として、工学的な知見と科学的な知見をストーリーボード作成に適用した研究事例を記述する。

(1) 研究の背景

現在わが国の高レベル放射性廃棄物処分で想定されている人工バリアの定置概念は、図 5.2.3-1 に示した 10 ケース存在する（朝野, 2004）。概念毎にベントナイトの施工法と定置方法が異なり、定置時の品質に差が発生するが、現在用いられている長期の安全評価では、これらの差異について考慮できていない

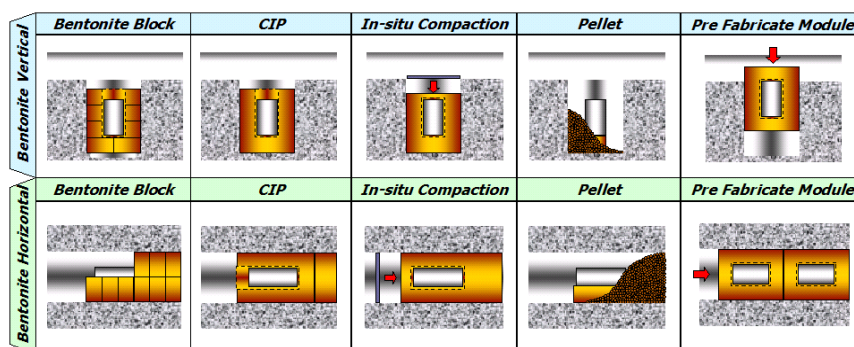


図 5.2.3-1 様々な定置概念とベントナイト定置方法（河村他、2004）

また、実際に想定される施工環境では、処分坑道建設時の掘削影響領域（EDZ）、覆工背面での地下水排水による岩盤中の不飽和領域、岩盤安定性のための堅固な支保工の設置、人工バリア定置後の埋戻しやプラグ、キャップの設置など、多くの材料が用いられ埋め戻し時に残置される（図 5.2.3-2 参照）。これらの残置物が人工バリアの長期変遷に与える影響についても、これまで考慮されていない。今後、現実的な挙動評価を行うために、またステークホルダーに説明するた

めにもこれらの概念の違いや残置される材料の影響についての考察が不可避となる。

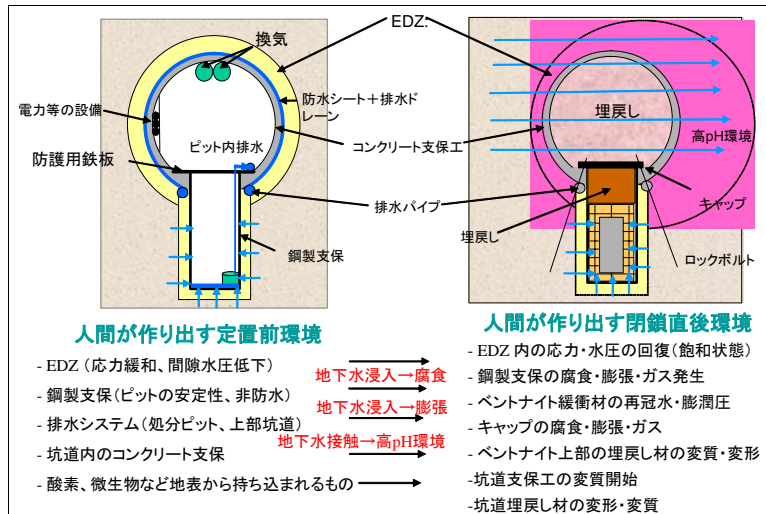


図 5.2.3-2 実際の人工バリア定置環境と閉鎖後の状態 (Kawamura et al.,2008)

(2) 人工バリアの長期挙動評価の着眼点

人工バリアの長期挙動評価では、ベントナイトに長期の安全機能が期待されていることもあり、その安全機能に着目した長期挙動解析が実施されている。第2次取りまとめ (1999 年) に記述された安全機能は以下の5機能である。

- ・ 止水性：低透水性による地下水の浸入速度の抑制と核種の移行抑制
- ・ コロイドろ過性：コロイド状となった核種の移行抑制
- ・ 自己シール性：内外の事象によるベントナイトの損傷を自己修復する性質
- ・ オーバーバック支持性：ベントナイトの強度特性と変形特性による耐久性
- ・ 応力・化学緩衝性：温度、内外圧に対する耐久性および化学変化への緩衝性

以上の機能をもたらすベントナイトの特性として、熱特性 (T)、水理特性 (H)、力学特性 (M)、化学特性 (C) があり、これらの特性は、ベントナイトの主成分であるモンモリロナイトの含有量と密度、緩衝材の形状 (厚さ) により決定される (Kawamura et al. 2008)。

天然ベントナイトを加工して緩衝材として用いる場合、モンモリロナイト含有量の調整と、製作時の密度分布が最も重要な指標となり、2つの指標を組み合わせた有効粘土密度という尺度を用いて機能設計がなされている (図 5.2.3-3参照)。

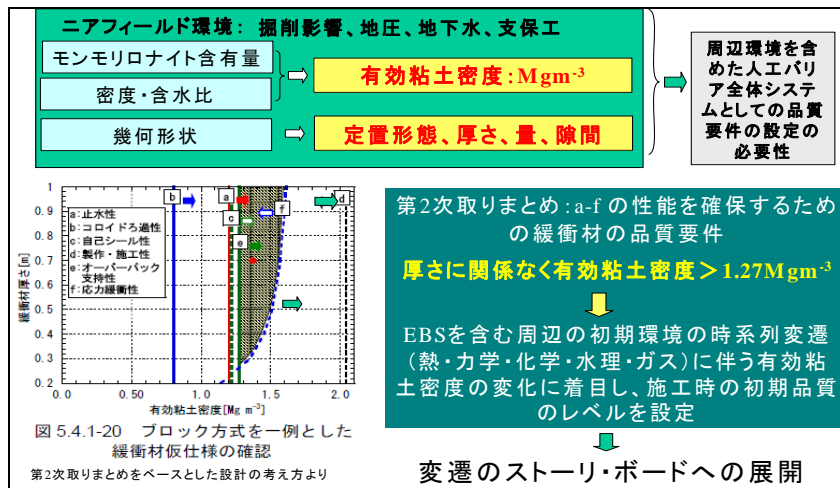


図 5.2.3-3 ベントナイトと衝材の安全機能を支配する特性（サイクル機構 1999）

サイクル機構の研究によれば、上記安全機能は、有効粘土密度が 1.27Mgm^{-3} 以上あれば確保できると唆されている。長期にわたりこの値を確保できるように、ベントナイト緩衝材を設計し、施工すること、また力学的な変形、化学的な変質等の総合作用で、特性が変質するプロセスや事象に着目した解析評価が求められている。その中で、前述したようにベントナイト密度の変化についての予測が安全機能の維持の観点から重要視されている。

10 種類の定置概念では、同じ成分と量のベントナイトを用いたとしても、加工方法や設置方法の違いにより、定置直後の特性は異なってくる。特に原位置で施工されるペレットや原位置締固めでは、密度分布のバラツキが顕著に発生する。またブロックや CIP を用いた場合、定置時の隙間や不連続面が発生し、PEM の定置では、岩盤や支保工との隙間が発生する。施工時に発生する不均質性が、長期の安全機能として期待されている特性に、どの時間枠でどれぐらい継続して影響を及ぼすのかについても、個別の課題として研究しておかねばならない。

(3) 人工バリアの長期変遷予測へのストーリーボードの導入

人工バリアの長期変遷のうち、特にベントナイトの長期変質を理解するために、専門家間で議論するために共通の場を作成する手法として、ストーリーボードを用いた研究を実施した。その一例を図 5.2.3-4に示す。

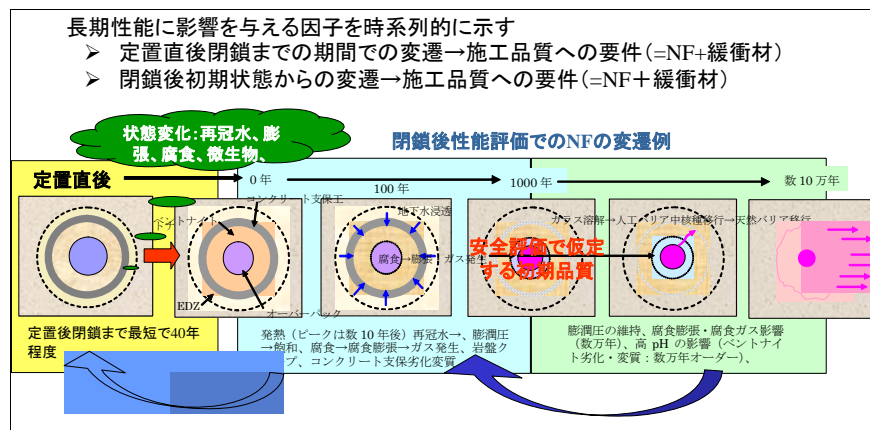


図 5.2.3-4 ストーリーボードによる人工バリアの変遷の理解 (Kawamura et al. 2008)

図 5.2.3-4 では、定置直後の人工バリアの 10,000 年までの変遷について、ベントナイトの密度に影響を及ぼすと推定される代表的な事象を記述している。ガラス固化体に閉じ込められた放射性核種は、オーバーパックの閉じ込め性能が喪失する 1,000 年後に地下水と接触することで溶解プロセスが始まる。安全評価における核種移行解析は、地下水への核種の溶解プロセスが開始する段階から実施される。そのため、1,000 年後の人工バリアの状態が評価の初期条件となる。1,000 年以降ベントナイトの密度変化は、力学や化学反応により継続して変動すると想定される。

図 5.2.3-3 に示されたベントナイトの安全機能を維持するためには、定置直後から長期にわたる、内外からの擾乱に対する耐久性を評価する必要がある。特に定置後 1,000 年間は、THMC の過渡的な変化があることから、安全評価の前提となる 1,000 年後の初期品質を担保できるように、定置段階での施工品質確保が重要となる。

(4) 安全評価の前提となる状態変化の分析

本節では、上記の考察に基づき、人工バリアを含む周辺に残置される材料の影響を考慮して、ストーリーボードを用いた状態変遷の分析を実施した。

図 5.2.3-5 に、ベントナイトブロックを用いた処分孔縦置き方式における状態変遷を、熱、水理、力学、および化学状態に分類しストーリーボードとして記述した。横軸に評価の時間枠を、縦軸に 4 つの観点からの状態変遷を配置した。図中、変化が大きいと想定される枠を、色の濃淡で表現している。また、枠内の記述については、既存の研究成果を考慮して、代表的と推定される

事象・プロセスを示している。以下に分類した状態変遷について、詳細を述べる。

【熱状態：T】

ガラス固化体の発熱は、製造されたときから継続するが、時間の経過と共に発熱量が小さくなり、定置後数10年以内にベントナイトは最高温度（100℃以下）となることが解析により示されている（サイクル機構、1999）。数100年後には周辺の岩盤温度まで低下する。発熱による温度変化は、処分場のレイアウト設計段階で、温度によるベントナイト変質がないように配慮されている。安全評価においては、オーバーバックの閉じ込め性能が所定の期間（1,000年）担保されるならば、熱影響がベントナイトの安全機能に与える影響はないと判断する。

【水理状態：H】

建設によって発生した空洞周辺のEDZ内では間隙が増大し、透水係数が周辺岩盤と比較して、1オーダーから2オーダー大きくなることが報告されている（サイクル機構、1999、2005）。さらに閉鎖されるまでの間、排水により間隙水圧が低下し不飽和状態となっている。閉鎖以降、処分孔内では、ベントナイトブロックが定置された直後から地下水が浸入し、EDZ内は飽和状態に移行するとともに、間隙水圧が回復していく。このようなプロセスは、閉鎖後数100年まで継続すると予測されている（サイクル機構、1999）。EDZは埋戻された後も周辺の岩盤に比較的高い透水係数を維持することから、EDZ内の高透水ゾーンに沿って、優先的に流れる地下水流動場が形成される可能性がある。この現象では、コンクリート支保工の劣化による間隙の増大に伴いEDZが拡大する可能性と、岩盤のクリープ変形による応力の回復との間に複雑なプロセスが考えられる。高透水ゾーンがどの程度長期間継続して処分坑道周辺に存在するかは不明であるため、安全評価上は保守的な判断で、EDZの高透水ゾーンの継続した存在を設定している（サイクル機構、1999）。

【力学状態：M】

建設の影響で処分孔と処分坑道周辺には、応力の緩み状態が発生している（EDZ）。これらの緩み域は、空洞内部が埋め戻された後、堆積岩であれば長期の時間の経過とともにクリープ変形で初期地圧に戻る可能性が、解析等で示唆されている。ベントナイトは地下水の浸入により膨潤圧を発生し、外部の水圧と岩圧間の応力の平衡状態に移行していく。また、オーバーバックの腐食膨張による内圧が作用して、人工バリア内が複雑な応力状態となった後、ベントナイトが持つ応力緩衝性により、時間をかけて均一な応力場に移行する可能性がある。反対に、コンクリートとの相互作用によりベントナイトが劣化・変質し、応力緩衝や自己修復性を喪失する可能性も示唆されている（Push, 1985）

【化学状態：C】

人工バリアが設置される岩盤内は、本来は還元雰囲気であるが、建設・操業時に持ち込まれる酸素により酸化領域となる。また、酸素とともに微生物や有機物が処分空間に持ち込まれ、様々な化学反応の触媒となる（West et al. 2007）。また、地下水の浸入プロセスでコンクリート材料が溶解し、高 pH 環境が形成されることが知られている（Alexander et al. 2000）。高 pH 地下水は、ベントナイトと接すると、モンモリロナイトに含まれるシリカ成分を溶解し、ベントナイトの特性を喪失させる可能性が示唆されている。これらの反応は、ベントナイト定置直後から開始され、数万年にわたり継続する可能性がある。


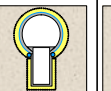
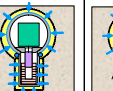
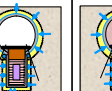
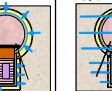
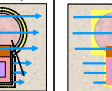
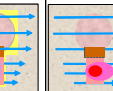

初期状態	掘削後	定置中	定置直後	閉鎖直後	～数100年	～数1000年	～100000年
							
温度状態:T 初期温度 35℃～45℃	処分坑道内の換気による温度制御	OPの発熱 処分坑道内の換気による温度制御	OPの発熱 処分坑道内の換気による温度制御	OPの発熱量の減少	OPから発熱の影響が無くなり周辺岩盤温度に回復	周辺岩盤温度	周辺岩盤温度
水理状態:H 地下水流速・動水勾配・透水係数・有効間隙率	排水による掘削影響領域(EDZ)での不飽和層の顕在化	処分孔のEDZの再冠水開始 緩衝材の再冠水の開始	処分孔のEDZの再冠水による不飽和層の減少 緩衝材の再冠水→緩衝材膨潤圧の発生	処分坑道のEDZ埋戻の再冠水開始 一膨潤圧の上昇	再冠水の完了 地下水流動場の当初状態への回復開始 緩衝材の膨潤圧の最大化	周辺地下水流動場が当初の地下水位に回復完了	隆起・侵食作用に伴う地下水流動場の変遷
力学状態:M 初期応力 5～10MPa	掘削による応力開放と支保材による安定性維持 地表からの空気の持込	支保材による安定性維持 緩衝材によるOPの支持 地表からの空気の持込	膨潤圧と外圧との釣り合い 緩衝材によるOPの支持 地表からの空気の持込	膨潤圧と外圧との釣り合い 緩衝材によるOPの支持 地表からの空気の存在と放射線分解でのガス発生	掘削影響領域が初期応力状態に回復開始 再冠水による空気の溶け込みと腐食によるガス圧の発生	掘削影響領域・支保材の影響の減少 初期応力状態への回復 継続的なガスの発生と緩衝材中の移行	初期応力状態 数万年後までガス発生継続
化学状態:C 還元雰囲気 pH=7.0	周辺は酸化状態 支保材の溶出による地下水pHの上昇	周辺は酸化状態 支保材の溶出による地下水pHの上昇	周辺は酸化状態 支保材の溶出による地下水pHの上昇	周辺は酸化状態 支保材の溶出による地下水pHの上昇	高pH環境 支保工の変質進行と喪失	高pH環境	高pH環境

図 5.2.3-5 人工バリアのストーリーボード：ベントナイトブロックを用いた堆積岩での処分孔
縦置き定置概念（Toguri et al. 2008）

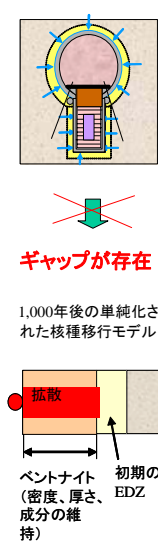
上記の4現象を個別に解析した例は数多く研究されているが、各現象の相互作用を考慮した長期の挙動を解析した例は報告されていない。また、様々な試験が実施されているが、現象が長期にわたるため、長期解析の確からしさを示す結果は得られていない。今回作成したストーリーボードは、全体の現象を俯瞰的に把握でき、どの時間枠で起こる現象が、人工バリアにとって重要となるかを示唆する役割と、異なる分野の専門家が人工バリアの特性変化について議論をするプラ

ットフォームとしての役割を果たすことができた。

(5) 人工バリアの品質確保の方策

人工バリアは、長期にわたり内外からの影響を受けて、特性を変化させるとともに複雑な挙動を示すことが想定される。一方で、バリアが有する応力や化学緩衝性、自己シール性の特性により、影響因子を低減させる特質も有することが知られている。長期の評価ではこれらの特性に関して考慮し、密度や厚さを増加する等の設計対応、および建設・定置技術による内外因子の削減対策が考えられている。表 5.2.3-1では、想定される影響因子への対応策を整理して示す。

表 5.2.3-1 人工バリア性能への影響因子と対応策 (Kawamura et al. 2008)



EBS性能の影響因子	第2次取りまとめをベースとした性能評価上の対応	設計対応	建設・定置技術での対応
a. EDZの変遷: - 応力・間隙水圧	EDZ内は母岩より流量が多いと仮定。変遷は考慮せず。長期挙動評価が不可欠	EDZの大きさと特性把握の調査と解析での変遷予測	EDZの規模を削減する施工方法の導入
b. 鋼製支保工の腐食・膨張・ガス発生	支保工の存在を考慮せず。設置した場合の影響評価は不可欠	支保設計と材料選定	処分ビットの掘削と支保設置の方法に開発が必要
c. ベントナイト挙動 - 再冠水→膨潤圧 - 密度変化→変形 - 変質(熱、高pH)	評価期間中はベントナイトの健全性を仮定。定置時の欠陥、長期での特性変化を考慮する必要あり	長期挙動と特性変化を考慮したベントナイトの密度、厚さ、成分の設計	信頼性のある遠隔定置技術(機器の性能目標、確認方法など設定が必要)
d. オーバーバック挙動 - 腐食 - 体積膨張 - ガス発生	バリアとしての性能は1,000年間として評価。長期の挙動は緩衝材への影響として評価	腐食量、内外圧を考慮したオーバーバックの材質と仕様設計	信頼性のある遠隔定置技術(機器の性能、検査方法などの準備が必要)
e. ブロック間、支保工との隙間	性能評価上は隙間なしで評価	ブロックの膨潤によりある程度の隙間はなくなる(実験と解析)と判断	隙間充填が必要な場合の遠隔充填技術
f. 緩衝材上部の充填材(非配合ベントナイト)	性能評価上は考慮せず。影響があると判断される場合は評価が必要	ベントナイトの膨潤圧と上載圧による設計(材料、仕様)	緩衝材に損傷を与えない施工方法
g. ギャッピング(鋼製+アンカー)	性能評価上は考慮せず。影響がある場合は評価が必要	膨潤圧に対する設計と耐用年数の設定	岩盤をいためずに設置する技術
h. 処分坑道に残置 - 支保工 - ドレーン - 埋戻し	性能評価上は考慮せず。人工バリアの性能への影響を考慮した評価が不可欠	材料の選定、シール・閉鎖設計	ドレーンのシール技術、埋戻し技術

人工バリアへの影響因子に関する研究は、前述したように多数実施されているが、それらの因子に対して長期の評価での取り扱い、設計での対応、建設・定置技術での対応に分けて整理した例は初めてである。このような整理もまた、ストーリーボードを用いた全体把握が可能となったため初めて実現できた。また、ストーリーボードで扱った人工バリア材料以外の、残置物からの影響因子を俯瞰的に整理した初めての試みである。次節以降では、これらの成果を出発点に、ベントナイトの特性に着目した影響因子の分析結果を示す。

(6) ベントナイトの特性に着目した影響因子の時系列的変遷分析

前節での人工バリア内外の影響因子の時系列的な変化について、ストーリーボードを用いて詳細に分析した。この分析での着眼点は、ベントナイト施工時の初期品質を確保するための、評価指標を設定することにある。図 5.2.3-6には、横軸に評価の時間枠を、縦軸に人工バリアの性能に影響を及ぼす材料と現象を因子として取り上げた (Kawamura et al. 2008)。評価の時間枠として、図では、特に人工バリアの変動が大きいと想定される 1,000 年までを 5 つの領域に色分けしている。

- ・ 初期状態から人工バリアの定置直後まで
- ・ 定置直後から閉鎖直後まで
- ・ 閉鎖から 100 年後まで
- ・ 100 年後から 1000 年後まで
- ・ 1000 年以降

図中では、それぞれの影響因子が評価の全時間枠において、継続可能と推定される範囲を、これまでの解析や研究成果をベースに矢印で示している。図 5.2.3-7～図 5.2.3-10は、図 5.2.3-6 で着目する時間枠の段階で分解し、それぞれの段階での影響因子の変遷状況と着眼点を記述した。

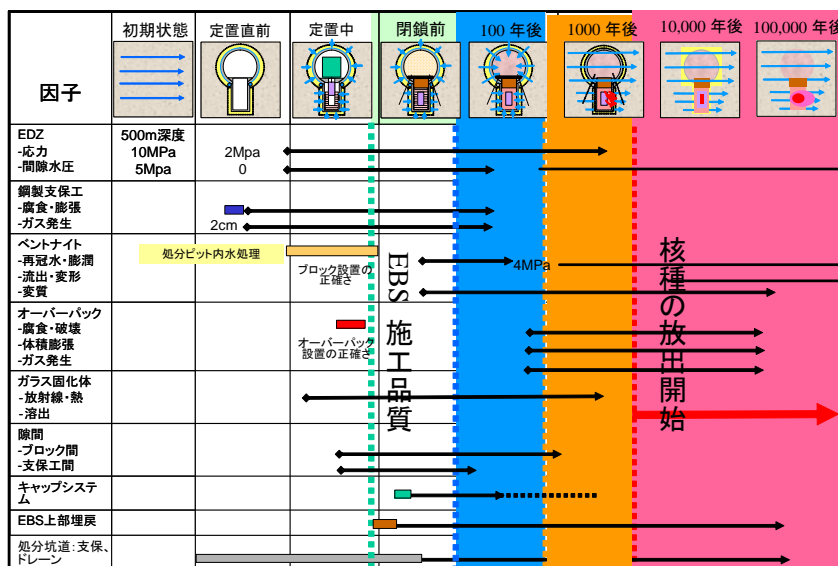


図 5.2.3-6 人工バリアの性能に与える因子の時系列的変遷 (Kawamura et al., 2008)

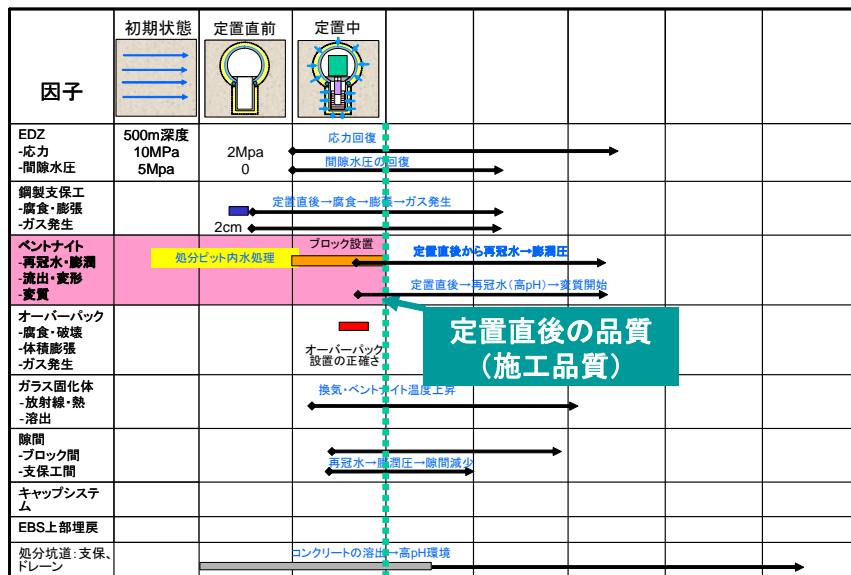


図 5.2.3-7 人工バリア定置直後までの段階での影響因子 (施工品質の影響因子)

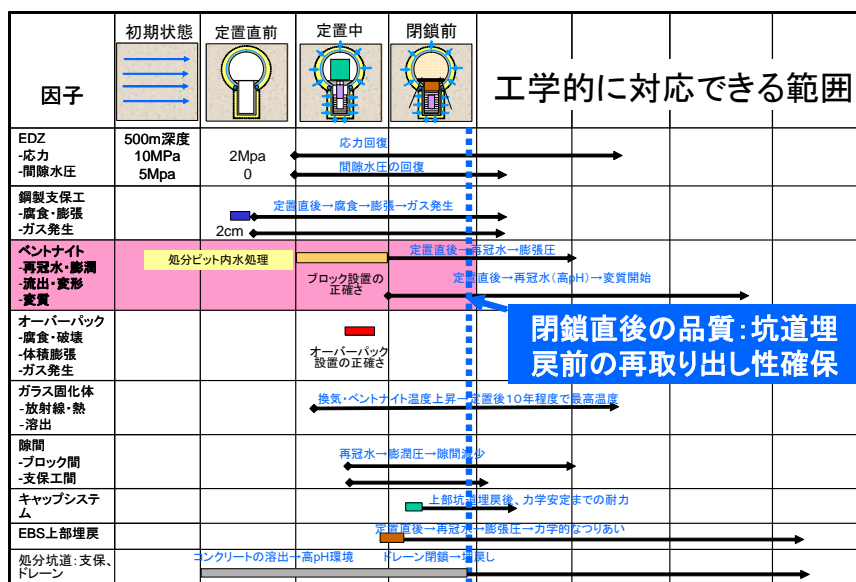


図 5.2.3-8 閉鎖直前までの人工バリアへの影響因子 (工学的に対応可能な時間枠)

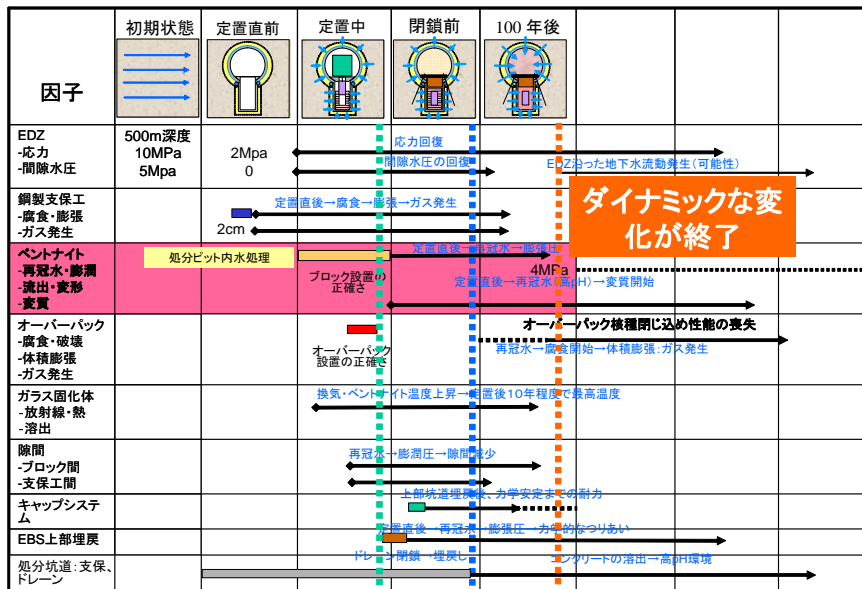


図 5.2.3-9 閉鎖後 100 年程度の時間枠での人工バリアへの影響因子の変遷（ダイナミックな変化が終了すると想定される期間）

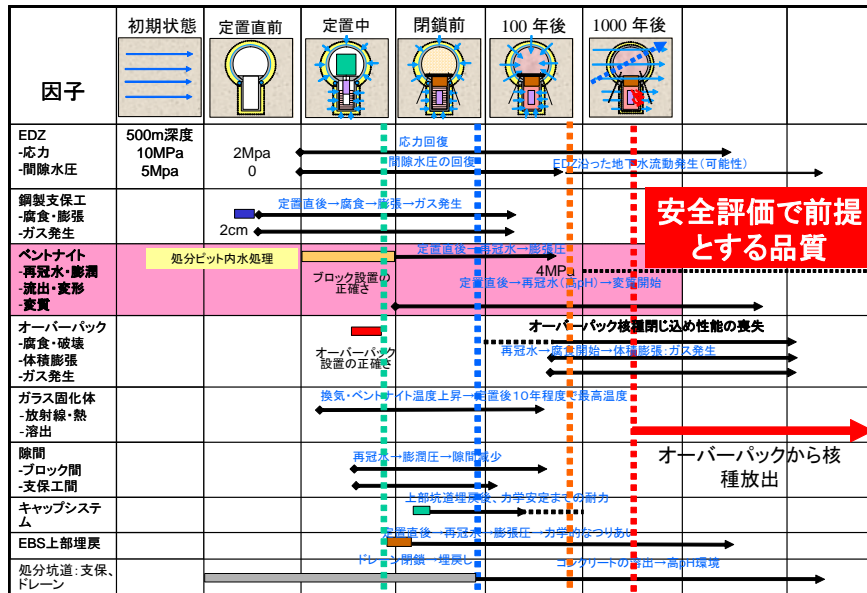


図 5.2.3-10 放射性核種の移行評価の前提となる段階での影響因子の変遷

それぞれの図における時間枠での影響因子の変遷を、外部境界である地下水流動場の変化、化学環境の変化を含めて総合的に考慮し、全ての因子がベントナイトの性能に集約した状況を図 5.2.3-11に示す。この図では、1,000 年後のベントナイトの初期性能を支配する因子を示すとともに、長期の評価で不確実性が高くなる因子を示唆している。

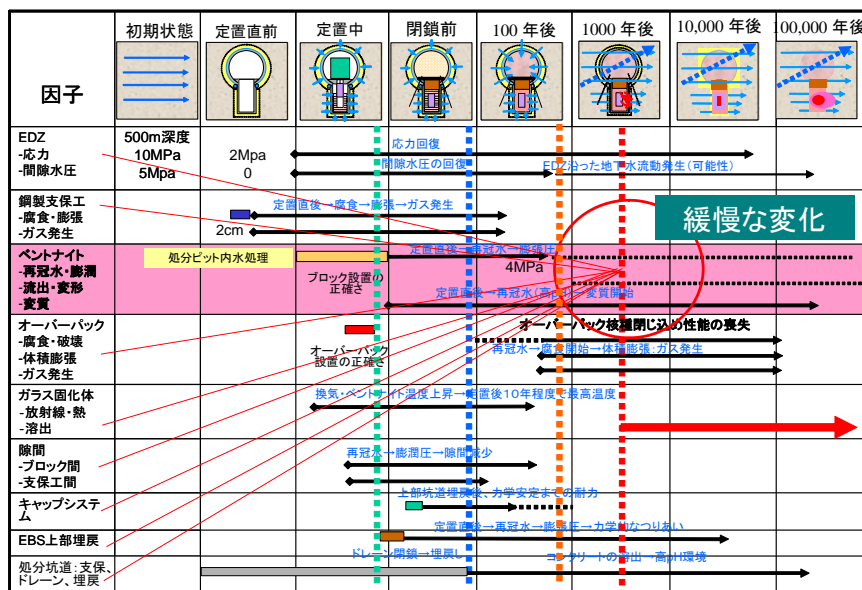


図 5.2.3-11 ベントナイトの性能に影響を及ぼす内外因子の時系列変遷

図中の影響因子を考察すると、施工時の定置環境と、定置直後からの地下水浸透による様々な反応が、人工バリアの状態変遷に大きな影響を及ぼしていることが分る (Kawamura et, al.2008)。したがって、人工バリアを定置する環境の初期状態から建設・操作中の変動幅を含めた把握と、施工初期における品質の確認が極めて重要である。また、処分場周辺の影響を受けた間隙水圧の回復とともに開始するベントナイトの再冠水挙動の把握が安全評価での前提を設定する上で重要であることを示唆している。さらに、図 5.2.3-8 に示す工学的に対応可能な期間での残置物に対して、確実な対応を図れば、長期の変遷において新たな影響因子の発生が抑制され、長期評価の不確実性を低減できることが分る。

人工バリアに期待される安全機能に対して考慮すべき事項と、施工時の品質確認の指標およびレベル設定を、図 5.2.3-12に整理して示す。この図は、ストーリーボードを用いた影響因子の分析

結果に基づき、1,000 年以降の安全機能を確保するために、初期の工学的な対応策をまとめたものである。長期にわたる人工バリアの状態変遷は、1,000 年以降では緩慢な変化となるため、工学的な対応と科学的なメカニズムの把握により、1,000 年までの品質に関連する不確実性を低減すれば、長期性能に影響を及ぼす新たな因子は発生しないという分析結果が得られた。



図 5.2.3-12 施工時の品質確保への要件と施工段階での対応技術 (Kawamura et al. 2008)

(7) まとめと今後の展開

本節では、人工バリアの安全機能について、工学的な観点から着眼すべき事項を明示するために、人工バリアの長期変遷と影響因子に着目し、ストーリーボードを適用した影響分析を実施した。ストーリーボードを工学と科学のインターフェースとした研究アプローチは前例がなく、ストーリーボードをプラットフォームとして活用し、異なる分野の専門家の議論を通じて、人工バリアの長期性能が、設置環境の把握と地下水の挙動把握に集約されるという結論を得、大きな成果を挙げることができた。

この成果は、ベントナイトの再冠水挙動をさらに詳細に研究する方向と、設置環境の変遷の把握への新たな研究へ展開されつつある。

【参考文献】

- 4) サイクル機構 (1999): わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ 分冊2 地層処分の工学技術—
- 5) サイクル機構 (2005): 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年取りまとめ 分冊2 工学技術の開発—
- 6) McKinley, I.G., Alexander, W.R., Arcilla, C.A., Kawamura, H., Takahashi, Y. (2007): IPHAP: a new natural analogue of bentonite alteration by cement leachates, Proc. Int. Symp. Radiation Safety Management, pp. 492-498
- 7) Hideki Kawamura, Ian G. McKinley (2008): Integrated safety case development for deep geological repositories, International Conference Underground Disposal Unit Design & Emplacement Processes for a Deep Geological Repository, (16-18 June 2008)
- 8) Hideki Kawamura, Ian G. McKinley, and Fiona B. Neall (2008): Practical and safe implementation of disposal with prefabricated EBS modules, International Conference Underground Disposal Unit Design & Emplacement Processes for a Deep Geological Repository, (16-18 June 2008)
- 9) Hideki Kawamura, Ian G. McKinley, Satohito Toguri, Hidekazu Asano (2008): Quantifying the performance of various EBS emplacement methods, IHLRWM 2008, Las Vegas, NV, Sep 8-12
- 10) West, J.M., McKinley, I.G., Neall, F.B., Rochelle, C.A., Bateman, K., Kawamura, H. (2006): Microbiological effects on the Cavern Extended Storage (CES) repository for radioactive waste—A quantitative evaluation, J. Geochem. Explor., 90, 114-122

第6章 まとめと今後の展開

6.1 研究のまとめ

原子力エネルギー利用の賛否に関しては、世界中で多くの議論がなされている。しかし、利用の結果発生する放射性廃棄物の処理・処分については、利便を受けたわれわれの世代で責任を持って対処すべきであるとする原則が、広く受け容れられている。その具体的な方策として、様々なオプションが検討され、現状の技術で実現可能で、最も信頼性の高いと判断される「地層処分」の概念がわが国を含め世界各国で選択されてきた。

地層処分においては、長期の安全性を確保するために、深部の地層が本来有する物質を閉じ込める特性（天然バリア）と工学的に放射性物質を閉じ込める対策（工学バリア）を組み合わせた多重バリアシステムが、世界共通の安全概念として選択された。この多重バリアシステムの性能を定量的に求め、要求される安全レベルの遵守を示す手法として確立されたのが安全評価手法であり、この手法を用いて、地層処分概念の科学・工学的な実現可能性が明示されてきた。

地層処分が実施段階に移行するにつれ明らかになった最も重要でかつクリティカルな課題は、処分実現に関連する様々なステークホルダーに地層処分をどのように受け容れてもらうかである。数十万年以上にわたる長期の安全性を示すには、多岐にわたる専門的な知識の統合化が必要であり、そこには高度な専門的判断が介在するため、多くのステークホルダーにとって、処分の安全性の本質を理解することが極めて難しくなっている。このような現実的な課題に対処するために、2000年代初頭に、安全評価による定量的な解析結果だけでなく、多方面にわたるエビデンスと説得力のある議論を統合した、セーフティケースの概念が国際機関を中心に提唱され、わが国においても実施主体を中心に準備が進められてきている。

セーフティケースを構築するためには、地層処分の安全概念の仕組みを分かりやすくかつ透明性をもって説明できる手法が不可欠である。地層処分の安全確保の基本概念であるパッシブ・セーフティに至るまでに必要となる統合化されたセーフティケース構築に着目した研究を実施した。統合化されたセーフティケースとは、処分場の閉鎖前の安全性や品質確保に着目したセーフティケースと閉鎖後の長期安全性に着目したセーフティケースを、処分場建設というアクティブな状

態からパッシブな状態に移行する意思決定をサポートする観点から構築するものである。

統合化されたセーフティケースを構築するアプローチとして、工学的、科学のおよび社会・倫理学的な観点からの取り組みの重要性を、様々なプロジェクトでの研究成果を用いて検証した。これらの研究の過程で、セーフティケースを用いて様々なステークホルダーの受容を得るには、まず分野の異なる専門家が、地層処分の安全性について共通の場で議論できるプラットフォームが必要であること、議論結果が容易に他のステークホルダーに説明できるインターフェースが必要であることを提唱した。

このような背景および要件を出発点として、地層処分の安全確保の方策を俯瞰的に理解するために、処分の状態変遷を異なる時間枠で、また着眼する対象領域のスケールで議論できるストーリーボードの概念を開発してきた。ストーリーボードでは、処分場の建設前の初期状態から処分場の建設・操業時での周辺への影響の範囲とそのプロセスを記述することで、周辺住民が危惧する事項への回答を準備するとともに、アクティブな状態からパッシブ・セーフティへの移行がどのような状況で実現されるのかを視覚的に、また工学・科学的な状況分析を踏まえて記述している。さらにストーリーボードには、長期の評価で扱う最も蓋然性の高い状態変遷の予測とそれに伴う不確実性を記述することで、セーフティケース構築上での留意すべき時間枠と評価スケールを同定することができる特長を有することが分かった。

わが国で進められている放射性廃棄物処分プロジェクトのセーフティケース構築に、開発したストーリーボードを適用した結果、技術的な観点からは、処分事業の各段階でセーフティケースを構築する上でのテンプレートとして活用できること、分野の異なる専門家が安全性に関する議論を行う共通のプラットフォームとしての役割を果たすことができること、また、社会・倫理学的な観点からは、処分システムの安全確保の仕組みについて、ステークホルダーに分かりやすく説明できるインターフェースとして活用できる見通しが得られた。

このような結論に至るまでに、本論文では、以下に示す三段階に分けて研究成果を取りまとめてきた。

第一段階の研究では、放射性廃棄物処分における安全確保の基本的考え方を調査・整理し、その具現化に向けた取り組みの歴史的な変遷と発生した問題点について分析した。その結果、定量

的な安全評価では長期の評価に伴う不確実性の存在から、多くの分野の専門家の判断が介在するため、評価に対するステークホルダーの理解が困難となることが示唆された。また、国際的な安全確保の考え方に立脚した、わが国における現状の廃棄物処分概念について、発生源とその処分場の特徴を整理した。地下への処分については、多重バリアの安全概念システムのうち、地質環境の安定性と人工バリアの健全性、特にベントナイト緩衝材の健全性が長期安全性の重要な要素であることを明示した。安全評価を中心とした取り組みに対する課題解決の方策として、国際機関が提唱したセーフティケースを取り上げ、その概念と処分概念への適用性について検討した。その結果、セーフティケース構築は、多くのステークホルダーへの説明性確保の観点から、段階的な処分事業の展開に伴った統合化が求められ、そのためには規制側からの要件、サイト固有の条件、事業化からの制約を考慮が必要となることを示唆した。また、地域住民は処分場の閉鎖後の安全性だけでなく、閉鎖前の安全性により関心があり、地層処分の安全確保の基本となるパッシブ・セーフティにいたる移行への環境をセーフティケースとして準備していく必要性を言及した。これらの要件に従い、第二段階以降で実プロジェクトでの具体的な取り組みを通じ、セーフティケース構築の新しい手法の開発に取り組んだ。

第二段階の研究では、まず、第一段階でのセーフティケースへの要件を考慮し、処分場の閉鎖前と閉鎖後に着目したセーフティケースのあり方について具体的な研究成果を記述した。閉鎖前のセーフティケースでは、作業時の安全性と品質保証が根幹をなす要素であることに着目し、放射性廃棄物を地下に埋設する際の安全性に関する7つの原則を提案した。これらの安全原則に対応し、地表での人工バリアの製作・加工作業、地下施設への搬入作業、地下での搬送作業および処分坑道での廃棄体の定置作業等の作業プロセスごとに、安全と品質確保に関する具体的な指標を設定した。これらの指標は、作業システムの概念設計における目標として活用されることになった。

閉鎖後のセーフティケースについては、ナチュラルアナログの活用に関する研究を取り上げた。閉鎖後のセーフティケースを構築する観点から、ナチュラルアナログに期待する7分野を特定し、各分野でナチュラルアナログの具体的な目標を設定した。これらの目標は、現在わが国におけるナチュラルアナログ研究の指標の一つとして用いられている。

処分事業の初期段階から構築されるセーフティケースでは、長期の安全性をパッシブ・セーフティに委ねることを受け容れてもらうために、閉鎖前から閉鎖後にいたる一連の安全性に係る論拠を準備することが求められる。論拠として必要とされる工学的なアプローチ、科学的なアプロ

一ちおよび社会・倫理的なアプローチについて、それぞれ具体的な研究成果を整理し取りまとめた。

工学的なアプローチでは、セーフティケースを工学的に具現化する研究として、まず、米国のアイダホ国立研究所との共同研究で実施した、多機能バリアシステムの開発成果を記述した。次に、閉鎖後の長期安全確保の要となる人工バリアシステムの合理化研究を取り上げ、最後に、最終処分への将来世代の選択の幅を広げることと処分概念の合理化を目標に、大規模空洞貯蔵・処分概念の設計研究成果を記述した。いずれも工学的に対処できる範囲で将来の安全性に対する不確実性を低減するとともに、ステークホルダーの意思決定への参画の機会を目指した研究である。

科学的なアプローチとして、長期安全性に直接関連のある地下水流動場の長期変動予測に関する研究成果を取りまとめた。わが国で立地の可能性の高い沿岸海底下の地下水理特性は、テクトニクスによる隆起・沈降や侵食作用、および気候変動により影響を受けてきた結果として存在している。これらの因子を考慮して、特定サイトでの情報をもとに、数十万年にわたる将来の変動予測の可能性について定量的に吟味した。また、サイト特性調査を体系的に実施するために、原環機構が実施する文献調査段階での調査システム・フローの開発を行なった。システム・フローでは、文献調査からの様々な情報と、概要調査地区選定時の考慮事項との関連性を、ダイアグラムでリンクさせ、判断指標と判断根拠も合わせて示すことで、サイト選定までの手順に決定プロセスの追跡性と透明性を加えることができた。科学的なアプローチには、適用するロジックと手法の正当性が求められるとともに、評価の時間枠と評価の領域での整合の取れた推定が求められる。

社会・倫理的なアプローチとして、人間の関与に依存しないパッシブ・セーフティに段階的に移行するための、制度的管理やモニタリングのあり方、処分場の閉鎖にいたるセーフティケース構築における安全評価のレビューのあり方を提案した。また、閉鎖に至るまでの意思決定の手法として、重み付け手法やスコアリング・モデルを開発し、多属性効用解析手法（MAA）を適用した分析を行い、試解析を通じてその有効性を確認した。これらの社会・倫理的なアプローチでは、価値観の異なる多くのステークホルダーが、処分の受け入れに関する意思決定に参加するための仕組みとともに、その前提となる地層処分の安全性の理解を支援するための手法の準備の必要性を言及した。

第三段階の研究では、第一、第二段階での成果を反映し、セーフティケース構築に向けての新しい手法を開発し、その適用性を研究した成果を取りまとめた。セーフティケースは、処分事業

の初期段階であるサイト選定・調査段階から構築を開始し、段階的に進められる処分地選定より得られた新しい知見に基づき見直されていく。したがって、現状でのサイト特性把握から将来の変遷予測、処分施設の初期性能の把握から将来の変質や変動予測、および処分された放射性物質の状態と移行挙動に関する知見が集約される。そこには多くの専門家の判断とナチュラルアナログや原位置試験、室内試験からのエビデンスも統合されることから、体系的に整理して示すテンプレートが必要となる。

このようなテンプレートを構築する手法として、処分の評価で着目する様々な時間枠（調査・評価、建設・操業・閉鎖、閉鎖後 1 万年、10 万年、100 万年）と評価の対象領域（人工バリア、天然バリア、生物圏など）をマトリクス状に組み合わせ、それぞれの升目で想定される場の変遷と挙動、物質の動き、および天然事象などの外部因子の影響について、時間経過と影響伝播を写實的に表現するストーリーボードを開発した。ストーリーボード作成は、処分の安全概念と多重バリアシステムの安全機能に関する変遷を理解するための出発点であり、試行を行うことで専門家が情報を共用するプラットフォームの役割を果たすことが確認できた。

ストーリーボードを実務に適用した研究として、余裕深度処分プロジェクトを対象に処分システムの変遷を表すストーリーボードを作成し、許認可に向けての安全概念と安全機能を照査する上での留意点を確認した。また、高レベル放射性廃棄物処分における安全評価シナリオを作成するワークフレームでは、初期の段階での処分システムの状態変遷を理解するために、ストーリーボードを作成し、特定サイトの情報をもとに試行を行い、専門家間での議論の共通の場としての役割を果たすことが確認できた。またストーリーボードは、処分システム全体を俯瞰することができ、その作成プロセスでの議論で、長期の安全確保において重要となるプロセスや事象を同定できることが分かった。人工バリアの初期性能と長期性能との関連について、特にニアフィールドの挙動に着目したストーリーボードを用いて吟味した結果、処分場の閉鎖までの工学的に対応できる段階でのベントナイト緩衝材の確実な密度管理が、長期の安全評価の不確実性を低減できることを明示した。実務レベルにストーリーボードを適用することで、セーフティケースの根幹となる安全性に係わる議論のプラットフォームとしての役割と、作成したストーリーボードを説明資料として用いることでステークホルダー間の議論のインターフェースとして活用できる見通しを得ることができた。

6.2 今後の展開

放射性廃棄物処分の長期安全性を論じるセーフティケースを構築するためには、様々なアプローチの統合化を図ることが必要であり、多分野の専門家をはじめ、多様なステークホルダーが参加できる共通の場の準備が求められる。これらの要件に対応できるストーリーボードは、評価の時間枠と領域を軸としたマトリクスとなり、関連する知見とともに状態の変遷を写實的に示すことで、セーフティケースとして求められる論拠の種類と内容を具体的に明示できる。

ストーリーボードは、放射性廃棄物処分の分野では、段階的なセーフティケース構築の手法として、実務上で有用であるとともに、本研究で示した例にとどまらず、多くの分野での活用が考えられる。例えば、土木構造物の経年劣化やライフ・サイクルコストの分析において、周辺環境条件の変化に対応した構造物の部位と全体の状態変遷を写實的に表わし、構造物に要求されている機能がどのようなプロセスあるいは事象で喪失していくかを、定量的な評価とともにストーリーボードで示すことで、メンテナンスや防護の必要なレベルとその時期を具体的に明示することができる。土木構造物を構築する場合、パブリック・アセットとしての長期評価を具体的に提示することが求められる時代になってきており、関連するステークホルダーの理解しやすい、説明用ツールとしてもストーリーボードの活用が図れると確信する。

謝 辞

20 年間にわたる放射性廃棄物分野での研究と実務を通じて、社内外の多くの人々にご支援とご援助を賜りました。本論文を取りまとめるにあたり、ここに感謝の言葉を述べさせていただきます。

筆者が、放射性廃棄物処分の分野に興味を持ったのは、1983 年から 1985 年の米国スタンフォード大学留学時代に、ニューメキシコ州で建設中であった WIPP を訪問したのが最初でした。世界で最初の放射性廃棄物の地層処分場として現在は稼働している本施設では、地下の原子力施設として、これまで経験したことのないほどの品質と安全管理が要求されており、工事に当たった諸先輩の苦勞されている様子が感じられました。

帰国後に、何を今後したいかと問われ、高レベル放射性廃棄物処分の研究と思わず言ってしまったのがこの分野の研究に取り組むきっかけになりました。故津室隆夫原子力本部長から、スイス Nagra に行つて放射性廃棄物処分の勉強をしてこいといわれたのも筆者にとって大きなステップアップになりました。スイス Nagra では、Charles McCombie 博士の下で、放射性廃棄物の安全評価について基礎的なことから実務のレベルまで幅広く多くのことを学ぶことができました。現在の私の本分野の基盤は、McCombie 博士の存在なしでは語ることはできません。機会を作ってくださった当事の上司の宇梶博士および故津室顧問には深く感謝いたします。

当時の同僚であった Ian McKinley 博士とは、帰国後も放射性分野における共同研究者として現在にいたっており、本論文の元になる様々な研究についても McKinley 博士からの強力な支援が不可欠でした。本当にありがとうございました。また帰国後は、当時の土木技術本部長であった故黒澤重男顧問の本分野への期待と叱咤激励、および長く原子力本部長として本分野への理解と熱意を頂きました大林芳久顧問に厚くお礼を申し上げます。この研究成果の取りまとめは、お二人の支援がなければ成し遂げられなかったと確信しています。

今回の論文を取りまとめにあたり、ご指導頂きました京都大学副学長大西有三教授とは、筆者が 1989 年から 1991 年にわたり当時の動力炉・核燃料開発事業団への出向中に、日本での岩盤水理の専門家を集めた委員会で始めてお会いしました。当時は委員会の主催者側として、大西先生から多くのご指導を受け、放射性廃棄物処分における地下水理に関する基礎を築くことができました。その後、長年にわたり多くのプロジェクトでご指導を仰ぐことができ、また本論文を提出する機会を作っていただきました。先生の強い後押しがなければ、この論文を形作ることにはなかったと思われます。改めて心から感謝します。

本論文を構成している多くの研究成果は、原子力発電環境整備機構殿、原子力環境整備促進・資金管理センター殿、日本原子力研究開発機構殿、日本原燃殿からの委託研究として実施した内容を取りまとめたもので、ご指導いただいた北山一美氏、赤坂秀成氏、土宏之氏、石黒勝彦氏、青木和弘氏、朝野英一氏、佐々木規行氏をはじめ皆様のご支援とご鞭撻に対し深くお礼申し上げます。

最後に本論文を仕上げるにあたり、原子力環境技術部の柴田千恵子さん、大熊史子さんには、大変お世話になりました。また、最終原稿の校正には、娘の麻衣子に協力してもらいました。ここに感謝の意を表します。